ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Моделі та методи удосконалення супутникових мереж для побудови каналів передачі інформації»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Волонтир / Ігор ВОЛОНТИР
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-62
Ігор ВОЛОНТИР

Керівник: Владислав КРАВЧЕНКО

Рецензент: Віктор ЗАЇКА

Київ – 2023

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
« » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Волонтиру Ігорю Віталійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Моделі та методи удосконалення супутникових мереж для побудови каналів передачі інформації»,
керівник кваліфікаційної роботи Владислав КРАВЧЕНКО, к.т.н., доцент,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 19.10.2023 р. №145.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Супутникові технології.
   2. Моделі розвитку супутникових мереж.
   3. Технічні специфікації Starlink та Iridium.
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Огляд сучасних супутникових мереж та їх проблеми.
   2. Методи удосконалення супутникових мереж.
   3. Моделі розвитку супутникових мереж для побудови каналів передачі інформації.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	19.10.23	Викон.
2.	Огляд сучасних супутникових мереж та їх проблеми	31.10.23	Викон.
3.	Методи удосконалення супутникових мереж	15.11.23	Викон.
4.	Моделі розвитку супутникових мереж для побудови каналів передачі інформації	29.11.23	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	11.12.23	Викон.
6.	Розробка презентації	18.12.23	Викон.

Здобувач вищої освіти Ігор ВОЛОНТИР

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи Владислав КРАВЧЕНКО

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 96 стор., 10 рис., 9 табл., 11 дж.

Мета роботи – дослідити та проаналізувати основні моделі та методи удосконалення супутникових мереж для побудови ефективних каналів передачі інформації

Об'єкт дослідження - супутникові мережі для передачі інформації.

Предмет дослідження – моделі та методи удосконалення супутникових мереж для побудови каналів передачі інформації.

Короткий зміст роботи: Робота спрямована на огляд існуючих супутникових мереж для передачі інформації та їх аналіз, виявлення основних проблем цих мереж (таких як обмежена пропускна здатність, затримки, надійність), а також визначення основних вимог до удосконалення цих мереж для ефективної передачі інформації. Робота включає аналіз різних видів супутників, їхніх характеристик та призначень, а також розглядає вплив різних архітектур супутникових мереж на їхню ефективність.

Було порівняно два методи удосконалення для двох супутникових систем Starlink та Iridium. Виміряні значення записано в таблицях.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СУПУТНИКОВІ МЕРЕЖІ, ПЕРЕДАЧА ІНФОРМАЦІЇ, МОДЕЛІ, МЕТОДИ, УДОСКОНАЛЕННЯ, ЗАТРИМКИ, НАДІЙНІСТЬ, АРХІТЕКТУРА, АНТЕННІ ТЕХНОЛОГІЇ.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 96 pages, 10 pictures, 9 table, 11 sources.

The purpose of the work - to study and analyze the main models and methods of improving satellite networks to build effective information transmission channels

Object of research – satellite networks for information transmission.

Subject of research – models and methods for improving satellite networks for building information transmission channels.

Summary of the work: The work is aimed at reviewing and analyzing existing satellite networks for information transmission, identifying the main problems of these networks (such as limited bandwidth, delays, reliability), and determining the main requirements for improving these networks for efficient information transmission. The work includes an analysis of different types of satellites, their characteristics and purposes, and considers the impact of different satellite network architectures on their efficiency.

Two improvement methods were compared for two satellite systems, Starlink and Iridium. The measured values are recorded in tables.

KEYWORDS: SATELLITE NETWORKS, INFORMATION TRANSMISSION, MODELS, METHODS, IMPROVEMENTS, DELAYS, RELIABILITY, ARCHITECTURE, ANTENNA TECHNOLOGIES.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Волонтир І.В. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Моделі та методи удосконалення супутникових мереж для побудови каналів передачі інформації

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Волонтир Ігор Віталійович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Волонтира Ігоря Віталійовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

"____" _____ 2023 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Волонтир І.В.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

"____" _____ 2023 року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Волонтира Ігоря Віталійовича

на тему: «Моделі та методи удосконалення супутникових мереж для побудови каналів передачі інформації»

Актуальність:

Робота зосереджена на дослідженні методів удосконалення супутникових мереж їх впливу на роботу сучасних супутникових мереж. Розробка нових методів маршрутизації, удосконалення протоколів передачі даних та використання новітніх технологій в цій області має ключове значення для подальшого розвитку супутникового зв'язку та його інтеграції в сучасні комунікаційні та інформаційні системи. З врахуванням тенденцій зростання вимог до передачі даних, особливо в аспекті глобального зв'язку, наукове дослідження моделей та методів оптимізації супутникових мереж має стратегічне значення.

Тому, теоретичні та практичні дослідження направлені на вирішення даних завдань є актуальними і своєчасними.

Позитивні сторони:

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показав високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.
2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

Недоліки:

1. Деякі отримані результати досліджень потребують додаткового аналізу для їх практичного застосування.
2. Запропонований в роботі алгоритм маршрутизації Multipath Routing потребує бажано представити у вигляді алгоритмічних блоків.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач ВОЛОНТИР Ігор Віталійович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Рецензент:

(науковий ступінь, вчене звання)	*(підпис)*	*(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*
		В.Ф. Заїка

ЗМІСТ

ВСТУП 8

1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ СУПУТНИКОВИХ МЕРЕЖ ТА ЇХ ПРОБЛЕМИ 9

1.1 Огляд існуючих супутникових мереж для передачі інформації 9

1.2 Аналіз основних проблем, з якими зіштовхуються сучасні супутникові мережі 16

1.3 Виявлення основних вимог до удосконалення супутникових мереж для ефективної передачі інформації 23

2 МЕТОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ СУПУТНИКОВИХ МЕРЕЖ 33

2.1 Використання передових технологій для підвищення пропускної здатності 33

2.2 Зменшення затримок у передачі даних 47

2.2.1 Використання нових алгоритмів маршрутизації 47

3 МОДЕЛІ РОЗВИТКУ СУПУТНИКОВИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПОБУДОВИ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ 60

3.1 Удосконалення моделі розвитку супутникової мережі Starlink методом використання нових алгоритмів маршрутизації 60

3.2 Удосконалення моделі розвитку супутникової мережі Iridium методом використання нових алгоритмів маршрутизації 78

ВИСНОВКИ 90

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 92

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 94

ВСТУП

Супутникові мережі, як складова сучасних засобів зв'язку, відіграють важливу роль у забезпеченні доступу до інформації в умовах, коли інші засоби зв'язку недоступні або обмежені.

Все більше компаній та технологічних гігантів вкладають ресурси у розвиток супутникових мереж з метою покращення якості зв'язку та розширення їхнього покриття. Це не лише забезпечує доступ до Інтернету у віддалених регіонах, але й є ключовим для технологічного розвитку, медичних та наукових досліджень, а також безпеки.

У цій роботі я розглянув аспекти сучасних супутникових мереж, включаючи їхню архітектуру, технологічні вдосконалення, а також вплив нових методів маршрутизації на їх функціонування. Також було розглянуто протоколи та алгоритми, що допомагають оптимізувати ці мережі, покращуючи їхню продуктивність та ефективність.

Мета дослідження спрямована на розкриття ключових аспектів розвитку супутникових мереж, виокремлення переваг та недоліків різних підходів, а також визначення можливих перспектив для майбутнього вдосконалення цих технологій.

1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ СУПУТНИКОВИХ МЕРЕЖ ТА ЇХ ПРОБЛЕМИ

1.1 Огляд існуючих супутникових мереж для передачі інформації.

Сучасний світ значною мірою покладається на супутникові мережі для передачі даних, забезпечення зв'язку та навігації. Ці мережі стали невід'ємною складовою багатьох галузей, від телекомунікацій до наукових досліджень.

Геостаціонарні супутники:

Геостаціонарні супутники – це особлива категорія штучних супутників, які знаходяться на орбіті, синхронній з обертанням Землі. Вони розташовані на висоті близько 35,786 км над поверхнею Землі, що відповідає приблизно 42,164 км від центра Землі. Це така висота, на якій період обертання супутника навколо Землі (період обертання) дорівнює періоду обертання самої Землі навколо своєї осі. Тому ці супутники здаються нерухомими відносно земної поверхні. [1]

Їх синхронна рухливість забезпечує стабільне покриття певної частини Землі, що робить їх ідеальними для різних застосувань:

Телекомунікації: Геостаціонарні супутники широко використовуються для передачі телекомунікаційних сигналів. Наприклад, супутники серії Intelsat та SES Astra використовуються для передачі супутникового телебачення, інтернет-з'єднань, голосового зв'язку та інших послуг.

Метеорологічні спостереження: Геостаціонарні супутники, такі як GOES (Система океанічних і атмосферних спостережень), використовуються для метеорологічних спостережень, прогнозу погоди, відстеження ураганів та інших природних явищ.

Навігаційні системи: Хоча головними системами навігації є низькорозташовані супутники (як GPS, Galileo, GLONASS), іноді геостаціонарні

супутники використовуються для допомоги в навігації, особливо для підтримки в геостаціонарних районах.

Приклади геостаціонарних супутників:

Intelsat: Компанія Intelsat має кілька геостаціонарних супутників, які використовуються для телекомунікаційних послуг у всьому світі.

SES Astra: Це одна з провідних компаній, яка надає супутникове телебачення та інтернетові послуги через свої геостаціонарні супутники.

GOES: Система GOES використовується для метеорологічних спостережень, забезпечуючи зображення Землі для відстеження погодних умов.

Ці геостаціонарні супутники грають критичну роль у забезпеченні зв'язку, передачі даних та спостереження земної поверхні, завдяки своєму особливому положенню та можливостям покриття великої території земної поверхні.

Низько розташовані супутники (LEO):

Супутники LEO розташовані на висоті до 2000 км над землею та обертаються з великою швидкістю. Вони забезпечують швидку передачу даних і частіше використовуються для спостереження Землі, Інтернету з космосу та навігації. [1]

Супутники, розташовані на низькій орбіті навколо Землі (LEO - Low Earth Orbit), це супутники, що обертаються на невеликій відстані від поверхні планети, зазвичай від 180 до 2,000 км. Їх низьке розташування забезпечує кілька переваг:

Зменшення затримок: Близькість до Землі дозволяє значно зменшити затримки в передачі даних у порівнянні з вищими орбітами.

Висока швидкість: Супутники LEO обертаються над Землею значно швидше, що дозволяє їм швидко охоплювати великі області.

Зменшення потужності сигналу: Завдяки близькості до Землі, супутники LEO можуть працювати з меншою потужністю сигналу, що зменшує витрати енергії та сприяє економії палива.

Ці супутники використовуються у різних галузях:

Навігаційні системи: Наприклад, GPS (Система глобального позиціонування) має супутники LEO, які забезпечують точність та швидкість навігаційних даних.

Мережі інтернету з космосу: Кілька компаній планують створити мережі інтернету, використовуючи супутники LEO, що мають намір забезпечити швидкий та доступний Інтернет на всій планеті.

Наукові дослідження: Супутники LEO використовуються для проведення наукових досліджень Землі, включаючи спостереження клімату, аналіз рослинності та змін у земній атмосфері.

Приклади супутників LEO:

Starlink (SpaceX): Проект компанії SpaceX, який планує створити глобальну мережу інтернету за допомогою супутників LEO.

OneWeb: Ця компанія також працює над розгортанням глобальної мережі Інтернету, використовуючи супутники LEO, для забезпечення доступу до Інтернету в будь-якій точці світу.

Супутники Starlink (Amazon): Amazon також планує створити свою мережу інтернету з космосу, використовуючи супутники LEO, що мають намір покрити великі території та забезпечити швидкий доступ до мережі.

Мережі констеляцій:

Мережі констеляцій представляють собою групу супутників, які працюють разом для забезпечення покриття земної поверхні та надання різних послуг. Це можуть бути супутники розташовані у низькій, середній або високій орбіті, які

працюють в спільності для досягнення специфічних цілей, таких як забезпечення глобального покриття зв'язком, навігацією або спостереженням Землі.

Існують різні типи мереж констеляцій, а основні приклади включають:

1. Глобальні мережі інтернету:

- Starlink (SpaceX): Ця мережа має на меті забезпечити глобальний доступ до швидкого Інтернету через супутники LEO.

- OneWeb: Аналогічно до Starlink, OneWeb також працює над розгортанням мережі для забезпечення Інтернету в будь-якій точці світу.

2. Системи навігації:

- GPS (Global Positioning System): Система, яка складається з супутників, що працюють у низькій орбіті для забезпечення точності навігації та місцезнаходження на земній поверхні.

- GLONASS: Система навігації, створена Росією, яка також використовує мережу супутників, щоб забезпечити точність місцезнаходження.

3. Системи спостереження:

- Landsat: Система супутників, які використовуються для зйомки зображень Землі, які використовуються в аграрній, екологічній та науковій діяльності.

- Sentinel (ESA): Супутники, які відслідковують зміни на Землі для моніторингу клімату, рівнів води та інших природних явищ.

4. Супутникові мережі для зв'язку:

- Iridium: Мережа супутників, яка забезпечує глобальний зв'язок через констеляцію супутників у низькій орбіті.

Ці мережі констеляцій використовуються для різних цілей, від забезпечення глобального зв'язку до моніторингу земної поверхні. Вони використовують розташування та співпрацю супутників для забезпечення покриття територій, які

важливі для певних послуг, і створюють інфраструктуру для надання різних корисних сервісів у всьому світі.

Призначення супутникових мереж

Супутникові мережі використовуються для різних цілей і функцій, від забезпечення зв'язку та навігації до наукових досліджень та спостереження за земною поверхнею. Ось деякі з основних призначень супутникових мереж та приклади для кожного з них:

Глобальний доступ до Інтернету: Наприклад, проекти Starlink від SpaceX і OneWeb працюють над створенням глобальних мереж супутникового Інтернету для надання швидкого Інтернет-зв'язку в будь-якій точці світу.

Телефонія та передача даних: Супутникові мережі, такі як Iridium та Globalstar, надають послуги телефонії та передачі даних у віддалених або під час кризових ситуацій, коли доступ до звичайних мереж зв'язку обмежений.

Глобальні навігаційні системи: Системи, такі як GPS (США), GLONASS (Росія), Galileo (Європейський Союз) та BeiDou (Китай), надають точні дані про місцезнаходження та навігацію для користувачів по всьому світу.

Метеорологічні спостереження: Супутники, такі як NOAA та Meteosat, служать для спостереження за погодою, кліматом та природними катастрофами.

Земельне картографування та зйомка: Супутники, наприклад Landsat та Sentinel, використовуються для отримання зображень земної поверхні для цілей картографування, аналізу рослинності, контролю за змінами земельних угідь тощо.

Космічні дослідження та дослідження Всесвіту: Супутники, такі як Hubble Space Telescope або спостереження в рамках міжнародних космічних програм, здійснюють дослідження космосу та Всесвіту.

Супутникова допомога під час природних катастроф: Використання супутникових даних для надання допомоги, пошуку та рятування під час природних лих, таких як повені, землетруси, урагани тощо.

Моніторинг кордонів та військових цілей: Використання супутників для моніторингу кордонів, військових цілей та безпеки.

Архітектура сучасних супутникових мереж

Сучасні супутникові мережі складаються зі складного апаратного та програмного забезпечення, яке дозволяє супутникам працювати разом для забезпечення різноманітних послуг у всьому світі. Основні складові частини архітектури сучасних супутникових мереж включають:

Різні орбіти: Сучасні мережі можуть використовувати супутники, розташовані на різних орбітах (наприклад, LEO, MEO, GEO), в залежності від потреби забезпечення певних послуг.

Спектральна ефективність: Використання різних частотних діапазонів для передачі різноманітних типів даних (голос, дані, відео).

Керування та моніторинг: Центр керує роботою супутників, виконує моніторинг їхнього стану, виправлення помилок та відладку системи.

Земні станції: Приймально-передавальні станції для взаємодії з супутниками, передачі команд, отримання даних і виконання різних функцій.

Термінали та приймачі: Обладнання, яке користувачі використовують для отримання послуг, таких як супутниковий Інтернет, телефонія, навігація тощо.

Сучасні супутникові мережі використовують різні стандарти та протоколи для передачі даних. Наприклад, стандарти для передачі даних у супутникових системах включають DVB-S2 (Digital Video Broadcasting - Satellite - Second Generation) для передачі мультимедійних даних та інші. Технології передачі даних: Використання різних комунікаційних стандартів і протоколів для передачі даних між супутниками, земною інфраструктурою та користувацькими обладнаннями.

Маршрутизація трафіку: Системи, які визначають найефективніші маршрути для передачі даних через супутникову мережу.

Приклади архітектури сучасних супутникових мереж:

Starlink (SpaceX): Мережа супутників LEO для глобального Інтернет-покриття. Система включає супутники, контрольно-управлінський центр, земні станції та термінали для користувачів. [6]

GPS (Global Positioning System): Глобальна мережа супутників для навігації та місцезнаходження, яка включає супутники на низькій орбіті, земні станції та користувацьке обладнання.

Iridium: Констеляція супутників, що працюють у низькій орбіті для забезпечення глобального зв'язку. [6]

Застосування супутникових мереж у різних галузях

Супутникові мережі знаходять широке застосування у багатьох галузях завдяки своїм унікальним можливостям забезпечення зв'язку, навігації, спостереження та передачі даних у будь-яку точку світу. Ось деякі з основних галузей, де вони застосовуються:

Глобальний Інтернет: Супутникові мережі, такі як Starlink від SpaceX та OneWeb, надають можливість отримання доступу до швидкого Інтернету в будь-якій точці світу, де недоступний традиційний зв'язок.

Мобільний зв'язок: Супутникові системи, такі як Iridium та Globalstar, забезпечують можливість телефонного зв'язку та передачі даних у віддалених або недоступних місцях.

Глобальні навігаційні системи: GPS (США), GLONASS (Росія), Galileo (Європейський Союз) та BeiDou (Китай) надають точне місцезнаходження та навігаційні дані у всьому світі для транспорту, військових потреб, рятувальних операцій та інших галузей.

Прогнозування погоди: Супутники використовуються для збору даних про погоду та кліматичних змін, що допомагає у прогнозуванні погоди та управлінні природними катастрофами.

Моніторинг енергетичних ресурсів: Супутники використовуються для моніторингу місць видобутку енергоресурсів, таких як нафта, газ, вітрова та сонячна енергія.

Моніторинг транспорту: Застосування супутникових систем для відстеження транспортних засобів, управління логістикою та покращення безпеки транспорту.

Телемедицина: Використання супутникових зв'язків для дистанційного медичного консультування та допомоги.

Надання допомоги під час природних катастроф: Супутникові мережі використовуються для координації допомоги під час природних лих, наприклад, під час повеней, землетрусів тощо.

Супутникові мережі стали невід'ємною частиною сучасного технологічного ландшафту. Їх різноманітність, призначення та використання в різних галузях роблять їх важливим інструментом для забезпечення зв'язку, навігації та наукових досліджень у всьому світі. З постійним розвитком та удосконаленням архітектури цих мереж, ми можемо очікувати подальше розширення їх можливостей та ефективності у майбутньому.

1.2 Аналіз основних проблем, з якими зіштовхуються сучасні супутникові мережі.

Сучасні супутникові мережі мають обмежену пропускну здатність, що стає серйозним обмеженням для передачі великого обсягу даних. Це обумовлено обмеженнями у використанні доступних радіочастот та широкосмугових каналів. За великої кількості користувачів супутникових систем, пропускна здатність може бути перевантажена, що призводить до затримок та зниження швидкості передачі даних. [2]

У супутникових мережах обмежена пропускна здатність може виникати з різних причин:

Особливості орбіт: Супутники, розташовані на низьких орбітах (LEO), можуть мати обмежену пропускну здатність через обмежений час перебування над певною точкою на землі. Оскільки вони рухаються швидше, то час доступу до кожної точки обмежений, що може вплинути на швидкість передачі даних.

Частотний спектр: Обмежені радіочастоти, якими можуть користуватися супутники, також впливають на загальну пропускну здатність. Обмежений спектр може призвести до обмеження швидкості передачі даних через супутникові канали.

Технічні обмеження: Специфікації супутникових систем, такі як обладнання на супутниках, антени, приймально-передавальні станції на землі та програмне забезпечення, також можуть обмежувати загальну пропускну здатність.

Попит на послуги: Інтенсивне використання супутникових мереж користувачами одночасно може призвести до перевищення максимальної пропускної здатності, що призведе до повільнішої передачі даних або навіть до перебоїв у зв'язку.

Для подолання обмеженої пропускної здатності в супутникових мережах застосовують різні стратегії, такі як оптимізація протоколів передачі даних, вдосконалення антенних систем, розвиток нових технологій стиснення даних, що допомагає максимізувати ефективність передачі та використання пропускної здатності супутникових мереж. [2]

Затримки в передачі даних

Однією з основних проблем є затримки в передачі даних через великі відстані між супутниками та земною станцією. Це особливо актуально для геостаціонарних супутників, оскільки вони знаходяться на великій висоті над землею, що призводить до великих затримок у передачі сигналу. Це може бути критичним для додатків, які потребують миттєвої реакції (наприклад, телефонні розмови).

Затримки у передачі даних у супутникових мережах виникають внаслідок часу, необхідного для переміщення сигналу від джерела до приймача через

супутники та інші елементи інфраструктури. Ці затримки можуть мати кілька причин та видів:

Пропагаційні затримки: Це час, який потрібно сигналу для переміщення через вакуум космосу. Незважаючи на те, що швидкість світла дуже велика, затримка все ще відчутна, особливо при великих відстанях, які супутникові мережі зазвичай охоплюють.

Обробка та передача на супутнику: Сигнал потребує часу на обробку та передачу на супутнику, що може варіюватися залежно від технічних можливостей супутника та його навантаження.

Затримки на землі: Після отримання сигналу супутник повинен передати його на землю через земну станцію, де відбувається обробка та розподіл сигналу.

Ці затримки можуть бути помітними в реальному часі при проведенні спілкування або передачі даних через супутникову мережу. Особливо це важливо для деяких застосувань, де низька затримка є критичною, наприклад, у випадках реального часу використання мережі для фінансових операцій, відеозв'язку, онлайн-ігор чи операційного управління.

Для подолання затримок у передачі даних у супутникових мережах розробляються та застосовуються різні стратегії, такі як вдосконалення протоколів передачі даних, використання оптимізованих шляхів маршрутизації, розвиток нових технологій передачі з мінімальними затримками. Технологічний прогрес спрямований на зменшення цих затримок та покращення швидкості та ефективності передачі даних у супутникових мережах.

Надійність зв’язку

Надійність зв’язку є іншою важливою проблемою для супутникових мереж. Атмосферні умови, сонячна активність та інші фактори можуть спричиняти перерви в зв’язку, що призводить до тимчасових втрат сигналу. Це особливо

важливо для додатків, де надійність зв’язку є критичною, наприклад, для систем екстреної сигналізації або навігації.

Надійність зв'язку у супутникових мережах визначається їхньою здатністю забезпечити стійкий та безперервний обмін даними між супутниками, земною станцією та користувацькими пристроями в різних умовах та обставинах. Це є критичним аспектом для багатьох застосувань, де надійність зв'язку важлива, наприклад, у медицині, енергетиці, телекомунікаціях, навігації тощо.

Основні фактори, які впливають на надійність зв'язку у супутникових мережах:

Стан супутників: Надійність зв'язку залежить від того, наскільки супутники здатні виконувати свої функції. Дефекти апаратного забезпечення, проблеми зі супутниковою антеною або енергопостачанням можуть призвести до перебоїв у зв'язку.

Погодні умови: Атмосферні умови, такі як дощ, туман, сніг чи бурі, можуть впливати на сигнал та призводити до його втрати або викривлення, зменшуючи надійність зв'язку.

Інтерференція: Навколишні радіоелектронні сигнали або перешкоди можуть впливати на якість та стабільність зв'язку, знижуючи його надійність.

Технічні збої: Помилки в програмному забезпеченні, проблеми зі змішувачами сигналу чи інші технічні аномалії можуть призвести до втрати зв'язку.

Для підвищення надійності зв'язку у супутникових мережах використовуються такі стратегії:

Резервування та резервне керування: Застосування дублювання та резервування апаратного забезпечення та систем керування для забезпечення безперервного зв'язку в разі виникнення проблем.

Керування змінами: Постійне вдосконалення систем та процесів для усунення можливих проблем зв'язку та забезпечення його стійкості в різних умовах.

Адаптивні та інтелектуальні системи: Використання систем, які можуть автоматично адаптуватися до змінних умов, шукаючи оптимальні шляхи передачі сигналу та уникати перешкод.

Надійність зв'язку у супутникових мережах є важливим аспектом, який постійно вдосконалюється та вдосконалюється для забезпечення стабільності та надійності послуг, що надаються користувачам у всьому світі.

Ефективність спектру та спектральний шум

Спектральна ефективність та спектральний шум - це поняття, що використовуються в телекомунікаційних системах, включаючи супутникові мережі, і вони мають важливе значення для передачі сигналів.

Спектральна ефективність:

Це міра, яка вказує, наскільки ефективно система використовує доступний частотний спектр для передачі даних. Чим вища спектральна ефективність, тим більше інформації може бути передано за одиницю часу в обмеженому частотному діапазоні. Основні методи досягнення високої спектральної ефективності включають:

Модуляція та кодування сигналів: Використання різних схем модуляції та кодування для ефективного використання частотного спектру.

Множинний доступ до каналу (Multiple Access Schemes): Розвиток методів, що дозволяють кільком користувачам використовувати один і той же частотний ресурс без взаємних перешкод.

Фільтрація та розділення каналів: Використання фільтрів та інших методів для мінімізації перекриття частотних каналів та максимізації пропускної здатності.

Спектральний шум:

Спектральний шум - це шум, який присутній в певному частотному діапазоні та може впливати на якість сигналу. Це шум, який присутній в спектрі сигналу й визначається рівнем шуму на кожній частоті в цьому діапазоні.

У телекомунікаційних системах спектральний шум може бути результатом різних чинників, включаючи тепловий шум в пристроях та апаратурі, перешкоди від інших сигналів або електромагнітних джерел.

Для зменшення впливу спектрального шуму та підвищення якості сигналу використовуються різні техніки, такі як:

Підсилення сигналу: Збільшення потужності сигналу відносно шуму, що дозволяє покращити співвідношення сигнал-шум (SNR).

Фільтрація та приглушення шуму: Використання фільтрів для приглушення небажаних частот та шумів.

Для ефективної передачі сигналів у супутникових мережах важливо балансувати спектральну ефективність та управляти спектральним шумом для забезпечення стабільної та надійної передачі даних.

Застосування обмеженого радіоспектру може призводити до проблеми спектрального переповнення, коли супутникові системи конфліктують між собою за використання доступних радіочастот. Це призводить до спектрального шуму та зниження якості сигналу, що ускладнює передачу даних.

Забезпечення конфіденційності та безпеки

Забезпечення конфіденційності та безпеки в супутникових мережах - це критичний аспект, оскільки ці мережі використовуються для передачі великого обсягу чутливої інформації у відкритому космічному просторі. Для збереження цілісності, конфіденційності та доступності даних використовуються різні підходи та технології:

Шифрування даних:

Застосування шифрування даних - це ключовий елемент для збереження конфіденційності. Всі дані, які передаються через супутникову мережу, повинні бути зашифровані, щоб забезпечити їхню безпеку під час передачі. Різні протоколи шифрування, такі як AES (Advanced Encryption Standard) або RSA (Rivest-Shamir-Adleman), використовуються для захисту даних в супутникових мережах.

Аутентифікація та авторизація:

Механізми аутентифікації визначають, що користувач або пристрій є дійсним ім'ям або об'єктом. Авторизація визначає, які дії або ресурси конкретний користувач може використовувати в мережі. Контроль доступу і права користувачів допомагають уникнути несанкціонованого доступу до даних. [3]

Фізична та кібербезпека:

Фізична безпека об'єктів, таких як супутники, антени та приймально-передавальні станції, важлива для уникнення несанкціонованого доступу або пошкодження обладнання. Кібербезпека включає заходи захисту від хакерських атак, вірусів та зловмисного програмного забезпечення, які можуть вплинути на безпеку та працездатність мережі. [3]

Моніторинг та аналіз загроз:

Постійний моніторинг мережі на предмет потенційних загроз та аналіз вразливостей допомагає вчасно виявляти та усувати можливі проблеми з безпекою.

Захист від перешкод:

Супутникові мережі можуть стикатися з різними видами перешкод, включаючи електромагнітні втручання чи фізичні втручання. Використання антиспаму, антивірусів та інших заходів захисту допомагає запобігти цим проблемам.

Забезпечення конфіденційності та безпеки є складною задачею в супутникових мережах через їхню природу, але відповідна імплементація шифрування, аутентифікації, контролю доступу та моніторингу може значно підвищити рівень захисту та довіру до таких мереж.

Низька енергоефективність

Багато сучасних супутників мають обмежений ресурс енергії, що обмежує їхню функціональність та тривалість служби. Необхідність живлення, віддаленість від джерел енергії та обмежений обсяг споживаної енергії - це проблеми, які потребують вирішення для покращення продуктивності та тривалості роботи супутників.

Аналіз основних проблем сучасних супутникових мереж свідчить про те, що існують великі виклики у забезпеченні ефективної передачі даних, надійного зв'язку та безпеки інформації через космічні системи. Вирішення цих проблем потребує постійних наукових та технологічних зусиль для подальшого розвитку та удосконалення супутникових мереж у майбутньому.

1.3 Виявлення основних вимог до удосконалення супутникових мереж для ефективної передачі інформації

Потреба у високій пропускній здатності

Однією з ключових вимог є збільшення пропускної здатності супутникових мереж. Швидко зростаючі потреби у великих обсягах даних (відео, великі файли, стрімінгові сервіси) вимагають суттєвого підвищення пропускної здатності для забезпечення ефективної передачі цих даних через супутникові системи. [4]

Основна проблема полягає в тому, що пропускна здатність може бути обмеженою через ряд факторів, і удосконалення цієї характеристики є критичним для забезпечення швидкісного та безперервного передавання даних.

Є такі ключові аспекти пропускної здатності:

Частотний діапазон:

Він визначає кількість частот, які можуть бути використані для передачі сигналів. Більший частотний діапазон дозволяє передавати більше даних одночасно.

Технології передачі даних:

Різні технології передачі (наприклад, кодування, модуляція) можуть мати різну ефективність у використанні доступного спектру для передачі даних.

Ширина смуги каналу:

Визначає кількість даних, які можуть бути передані через канал за одиницю часу. Широкі смуги каналу дозволяють передавати більше інформації.

Рівень завантаження:

Велике число користувачів, що одночасно використовують мережу, може обмежувати пропускну здатність через розділення доступного ресурсу між користувачами.

Ефективність протоколів та компресія даних:

Використання ефективних протоколів передачі та методів компресії даних дозволяє оптимізувати використання доступної пропускної здатності.

Технічні обмеження супутникової системи:

Наприклад, обмеження на обсяг передаваної енергії або апаратне обмеження супутникової системи.

Удосконалення пропускної здатності включає в себе розвиток нових технологій передачі даних, оптимізацію використання ресурсів, підвищення ефективності протоколів передачі, а також удосконалення обладнання для підвищення швидкості та масштабованості передачі даних через супутникові мережі.

Мінімізація затримок у передачі даних

Вимагається скорочення затримок у передачі даних через супутникові мережі. Для багатьох додатків (онлайн ігри, VoIP) затримки є критичними. Розвиток нових технологій для оптимізації маршрутизації та підвищення швидкості передачі може допомогти зменшити ці затримки.

Низька затримка (також відома як пінг або latency) є важливою характеристикою у супутникових мережах, оскільки вона визначає час, необхідний для передачі сигналу від відправника до отримувача. У супутникових системах затримка може бути відчутною через велику відстань, яку повинен пройти сигнал у космічному просторі, що може призводити до певних проблем. Ось деякі ключові аспекти низької затримки:

Час передачі сигналу:

Він визначається відстанню, яку повинен пройти сигнал від відправника до супутника та зворотно. У супутникових мережах ця відстань може бути значною, що призводить до великої затримки, порівняно з земними мережами.

Технічні обмеження супутникової системи:

Деякі технічні аспекти, такі як обробка сигналів або швидкість обміну даними, можуть призводити до додаткової затримки.

Маршрутизація сигналу:

Шлях, який обирається для передачі сигналу в супутниковій мережі, також може впливати на затримку. Оптимізація маршруту може зменшити час пересилання сигналу.

Технології та протоколи:

Використання новітніх технологій передачі, таких як розроблені для цього протоколи, може допомогти зменшити затримку.

Низька затримка є критичною для ряду застосувань, особливо для реального часу та інтерактивних додатків, таких як відеозв'язок, онлайн-ігри, фінансові торгівлі та медичні системи телемедицини. Затримка може вплинути на якість обслуговування та користувацький досвід. Тому удосконалення технологій та інфраструктури супутникових мереж для зменшення затримки є важливою задачею, що дозволяє покращувати ефективність та забезпечувати більш високу якість обслуговування для кінцевих користувачів.

Покращення надійності та стабільності зв'язку

Вимагається підвищення надійності супутникових мереж. Розробка механізмів автоматичного виявлення та коригування помилок, впровадження технологій для забезпечення резервування та відновлення зв'язку може значно покращити стабільність мережі.

Надійність зв'язку у супутникових мережах - це ключовий аспект, який визначає стабільність та доступність мережі для передачі даних без перерв чи втрати сигналу. Є такі важливі фактори, які впливають на надійність зв'язку:

Стабільність сигналу:

Супутникові мережі можуть стикатися з різними перешкодами, такими як погодні умови, електромагнітні втручання, інші радіосигнали тощо. Забезпечення стабільного сигналу в умовах таких перешкод важливо для надійності зв'язку.

Управління каналом зв'язку:

Динамічне управління каналом передачі даних для адаптації до змін у мережі або умовах передачі може покращити надійність зв'язку.

Резервування та переключення:

Застосування механізмів автоматичного резервування, які дозволяють швидко переключати зв'язок на інші супутники або шляхи, може забезпечити неперервність зв'язку в разі відмови основного з'єднання.

Керування трафіком:

Ефективне керування трафіком, яке враховує обсяг та природу передачі даних, може зменшити перевантаження мережі та покращити її стабільність.

Обробка помилок:

Механізми виявлення та корекції помилок в переданих даних допомагають запобігти втратам сигналу та забезпечити їхню правильність.

Системи резервного живлення:

Використання систем резервного живлення або механізмів резервування енергії дозволяє уникнути перерв у зв'язку через відмови живлення.

Системи моніторингу та управління:

Постійний моніторинг роботи мережі дозволяє вчасно виявляти та усувати проблеми, підвищуючи надійність зв'язку.

Надійність зв'язку в супутникових мережах є важливим аспектом для різних застосувань, від телекомунікаційних послуг до критичних систем зв'язку у сфері медицини та екстрених ситуацій. Забезпечення стійкості та неперервності зв'язку допомагає підтримувати ефективність мережі та задовольняти потреби користувачів у стабільному зв'язку.

Ефективне використання радіоспектру

Вимагається ефективне використання обмеженого радіоспектру для підвищення продуктивності супутникових мереж. Розвиток нових технологій модуляції та спектральної ефективності дозволить оптимізувати використання радіочастот та уникнути конфліктів між супутниковими системами.

Ефективне використання радіоспектру у супутникових мережах є ключовим аспектом для оптимізації передачі даних та підвищення продуктивності мережі. Врахування цього аспекту дозволяє оптимізувати використання доступного

радіочастотного спектру та забезпечити ефективну комунікацію. Є такі аспекти ефективного використання радіоспектру:

Спектральна ефективність:

Використання різних технологій передачі дозволяє ефективно використовувати радіочастотний спектр, дозволяючи передавати більше даних за одну одиницю часу та частоту.

Методи розв'язання перешкод:

Розв'язання проблем інтерференції та зменшення впливу шуму дозволяють забезпечити більш ефективне використання радіоспектру.

Модуляція та кодування:

Використання різних методів модуляції та кодування дозволяє передавати більше інформації через той самий радіочастотний спектр.

Динамічне управління радіочастотними ресурсами:

Управління ресурсами дозволяє розподіляти доступний спектр на оптимальні частоти та канали для максимально ефективної передачі даних.

Когнітивне радіо:

Це технологія, що дозволяє адаптивно користуватися радіоспектром, забезпечуючи максимально можливе використання доступних частот.

Розумні алгоритми прийому та передачі:

Використання алгоритмів, які дозволяють максимально ефективно організувати передачу даних, підвищуючи пропускну здатність та мінімізуючи затримки.

Динамічні адаптивні системи:

Системи, які можуть автоматично реагувати на зміни у спектрі та умовах передачі, дозволяють оптимізувати використання радіоспектру.

Ефективне використання радіоспектру в супутникових мережах дозволяє підвищити продуктивність та ефективність мережі, зменшуючи затримки, підвищуючи пропускну здатність та забезпечуючи стабільний зв'язок у різних умовах. Технології, спрямовані на оптимізацію використання радіоспектру, постійно розвиваються для підвищення ефективності супутникових мереж та забезпечення більшої доступності та швидкості передачі даних. [4]

Підтримка майбутніх технологій та стандартів

Вимагається готовність супутникових мереж до підтримки майбутніх технологій та стандартів зв'язку. Розвиток супутникових мереж повинен бути орієнтованим на майбутні вимоги ринку та технологічні інновації.

Підтримка майбутніх технологій та стандартів у супутникових мережах вкрай важлива, оскільки це забезпечує гнучкість, здатність до розвитку та відповідність новим вимогам у світі зв'язку та технологій. Ось деталізація цього питання:

Сумісність із майбутніми стандартами:

Супутникові мережі повинні бути сумісними з майбутніми стандартами зв'язку та технологій, щоб забезпечити безперервність зв'язку та можливість спільної роботи з іншими мережами.

Гнучкість у розвитку:

Інфраструктура мережі повинна бути гнучкою для інтеграції нових технологій та розвитку, забезпечуючи швидку адаптацію до змін у вимогах.

Стандартизація та відкритість:

Участь у процесі стандартизації сприяє розробці спільних технічних стандартів, що дозволяє створювати відкриті мережі, що підтримують різні пристрої та послуги.

Підтримка нових послуг та застосувань:

Сучасні та майбутні супутникові мережі мають забезпечувати підтримку для нових послуг та застосувань, таких як IoT, обробка великих обсягів даних (Big Data), високошвидкісний інтернет тощо.

Удосконалення пропускної здатності та затримок:

Майбутні технології мають спрямовуватися на підвищення пропускної здатності та зменшення затримок у супутникових мережах, що робить їх більш конкурентоспроможними.

Безпека та конфіденційність:

Розвиток майбутніх технологій повинен включати заходи з посилення безпеки та конфіденційності передачі даних у супутникових мережах.

Енергоефективність та стійкість:

Вдосконалення технологій для зменшення споживання енергії та підвищення стійкості до зовнішніх впливів також є важливим аспектом.

Підтримка майбутніх технологій та стандартів у супутникових мережах відображає необхідність постійного розвитку та адаптації до нових умов, що дозволяє забезпечувати передові можливості для користувачів та конкурентоспроможність систем на ринку зв'язку.

Співпраця з іншими технологіями

Вимагається інтеграція супутникових мереж з іншими технологіями (наприклад, 5G, IoT) для покращення сумісності та взаємодії різних систем зв'язку.

Співпраця супутникових мереж з іншими технологіями відіграє важливу роль у покращенні ефективності зв'язку та розширенні можливостей їхнього застосування. Вона дозволяє комбінувати переваги різних технологій для покращення якості зв'язку, забезпечення більшої доступності та підвищення ефективності мережі. Ось кілька ключових аспектів співпраці супутникових мереж з іншими технологіями:

Терестріальні мережі та супутникові системи:

Інтеграція супутникових мереж із терестріальними телекомунікаційними системами дозволяє забезпечити безперервний зв'язок в різних місцях, навіть в труднодоступних територіях.

5G та інші бездротові технології:

Поєднання супутникових мереж зі швидкими бездротовими технологіями, такими як 5G, дозволяє покращити швидкість та пропускну здатність зв'язку, що особливо важливо для високошвидкісних передач даних.

Інтернет речей (IoT):

Супутникові мережі можуть стати важливою складовою для підтримки масштабних мереж IoT, забезпечуючи підключення віддалених та мобільних пристроїв.

Cloud технології:

Використання хмарних технологій для оптимізації обробки та зберігання даних, що передаються через супутникові мережі, може підвищити їхню ефективність та масштабованість.

Авіаційні технології та навігація:

Використання супутникових систем для покращення навігації та безпеки в авіаційній індустрії є важливим аспектом співпраці з цим сектором.

Спостереження землі та геопросторові технології:

Інтеграція супутникових мереж з системами спостереження землі дозволяє отримувати дані для різних галузей, включаючи аграрний сектор, моніторинг клімату, транспорт тощо.

Медичні технології та телемедицина:

Співпраця з медичними технологіями та телемедициною дозволяє забезпечити зв'язок для віддалених медичних консультацій та діагностики.

Ці співпраця та інтеграція з іншими технологіями допомагають розширити можливості супутникових мереж, покращуючи якість та доступність зв'язку та розширюючи їхнє застосування у різних сферах життя та промисловості.

2 МЕТОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ СУПУТНИКОВИХ МЕРЕЖ

2.1 Використання передових технологій для підвищення пропускної здатності.

Нові частотні діапазони

Нові частотні діапазони в супутникових комунікаціях охоплюють використання міліметрових хвиль (міліметровий, Ka- та V-діапазони), які дозволяють передавати велику кількість даних через короткі відстані. Перехід на вищі частотні діапазони дозволяє збільшити пропускну здатність каналу, оскільки вищі частоти мають більшу пропускну спроможність.

Міліметрові хвилі (міліметровий діапазон) входять до високочастотного радіоспектру і займають діапазон частот від приблизно 30 Гігагерц (ГГц) до 300 ГГц. Ці хвилі мають коротку довжину хвилі порівняно з іншими діапазонами радіохвиль, приблизно від 1 до 10 міліметрів, відсюди і назва. [11]

Можна виділити такі переваги:

Висока пропускна здатність: Можливість передавати великі обсяги даних за короткий час, що важливо для високошвидкісного Інтернету та передачі великого обсягу даних (відео, великі файли тощо).

Низькі затримки: Хороша пропускна здатність сприяє зменшенню затримок у передачі даних.

Використання для 5G мереж: Міліметрові хвилі використовуються для створення 5G мереж для високошвидкісного Інтернету та мобільних мереж нового покоління.

До недоливів можна віднести:

Обмежена проникливість: Втрати сигналу через перешкоди (стіни, дощ, туман) можуть суттєво впливати на якість зв'язку.

Коротка дальність передачі сигналу: Зв'язок на міліметрових хвилях має обмежену дальність в порівнянні з нижчими частотами, тому потребує більшої кількості точок доступу для покриття території.

Вплив погодних умов: Висока вологість повітря може суттєво впливати на передачу сигналу.

Нові частотні діапазони відіграють ключову роль у вдосконаленні супутникових мереж, принципово змінюючи їхні можливості а саме:

Збільшення пропускної здатності:

Більша пропускна здатність: Нові частотні діапазони, такі як міліметровий діапазон, Ka- та V-діапазони, мають вищі частоти, що дозволяє передавати більше даних за одиницю часу. Це збільшує загальну пропускну здатність супутникових каналів.

Ефективне використання спектру: Нові частотні діапазони дозволяють використовувати більш широкий спектр радіочастот, що дозволяє розподіляти більше каналів для передачі даних.

Покращена якість зв'язку:

Менша затримка: Вищі частоти дозволяють зменшити затримку у передачі даних, що особливо важливо для високоінтерактивних додатків, таких як відеоконференції, онлайн-ігри тощо.

Покращена роздільна здатність та якість сигналу: Використання вищих частот дозволяє отримувати сигнали з вищою роздільною здатністю, що покращує якість передачі даних.

Розширення можливостей мереж:

Забезпечення покриття: Різні частотні діапазони можуть бути використані для різних цілей. Наприклад, міліметрові хвилі забезпечують високу пропускну

здатність на короткі відстані, тоді як нижчі частоти можуть забезпечити краще покриття на великій площі.

Розвиток нових послуг: Завдяки більшій пропускній здатності та покращеному зв'язку, супутникові мережі можуть підтримувати нові послуги, такі як відеоконференції високої якості, потокове відео у великому масштабі тощо.

Інновації у технологіях:

Підтримка майбутніх стандартів: Нові частотні діапазони дозволяють підтримувати майбутні стандарти зв'язку, такі як 5G та Інтернет речей, що дасть можливість розвивати сучасні та нові сервіси.

Інноваційні дослідження: Розвиток нових частотних діапазонів також стимулює дослідження та розробку нових технологій та методів для підвищення продуктивності та ефективності супутникових мереж.

Розвиток нових модуляційних методів

Розвиток нових методів модуляції є ключовим аспектом у покращенні ефективності супутникових мереж. Модуляція - це процес кодування інформації для передачі через канал зв'язку. Використання нових модуляційних методів дозволяє оптимізувати передачу даних, підвищувати пропускну здатність каналів і знижувати рівень помилок.

Основні аспекти розвитку нових методів модуляції:

Більша ефективність спектру: Нові модуляційні методи дозволяють передавати більше даних за одиницю часу при тому ж спектральному ресурсі. Наприклад, більш складні методи, такі як 16-QAM (16-місний квадратичний амплітудний модулятор) або 64-QAM, дозволяють кодувати більше бітів в кожному символі, що збільшує пропускну здатність каналу.

Краща стійкість до помилок: Деякі нові модуляційні методи, такі як COFDM (кодований ортогональний частотний мультиплекс), забезпечують покращену

стійкість до шуму і спотворень сигналу. Це дозволяє зменшити втрати даних під час передачі у вимогливих умовах каналу передачі.

Адаптація до умов каналу: Деякі нові методи модуляції мають можливість автоматично змінювати параметри передачі в залежності від умов каналу (наприклад, зміна швидкості передачі чи типу модуляції). Це дозволяє оптимізувати передачу в реальному часі для досягнення найкращої продуктивності.

Підвищення швидкості передачі даних: Завдяки більш складним та ефективним методам модуляції можливо досягнення більшої швидкості передачі даних в супутникових мережах без збільшення ширини смуги.

Розберемо один із актуальних методів модуляції.

Один із нових та актуальних методів модуляції, який здобуває популярність у сучасних телекомунікаціях, це метод модуляції відкритого ключа (OOK) у поєднанні з методом навчання за допомогою машинного навчання, таким як нейронні мережі.

OOK (On-Off Keying) є окремим випадком модуляції ASK (Shift Keying). OK, якщо одна амплітуда дорівнює 0, а інша не дорівнює нулю. Двійкова двопозиційна маніпуляція (OOK: On-Off-Keying), також відома як двійкова амплітудна маніпуляція (2ASK), використовує однополярну кодову послідовність без повернення нуля для управління ввімкненням і вимкненням синусоїдальної несучої. Цей метод модуляції передує методу аналогової модуляції, який використовується для радіопередач азбукою Морзе. [10]

Оскільки антишумові характеристики OOK не такі хороші, як у інших методів модуляції, цей метод модуляції не підходить для сучасного супутникового зв'язку і цифрового мікрохвильового зв'язку. Однак завдяки простоті реалізації цього методу модуляції амплітудна маніпуляція реалізується у волоконно-оптичних системах зв'язку і знаходить широке застосування. Метод аналізу методу модуляції є базовим, тому базову теорію цифрової модуляції можна вивчити,

починаючи з введення методу модуляції OOK. На рис. 2.1 розглянуто метод модуляції відкритого ключа.

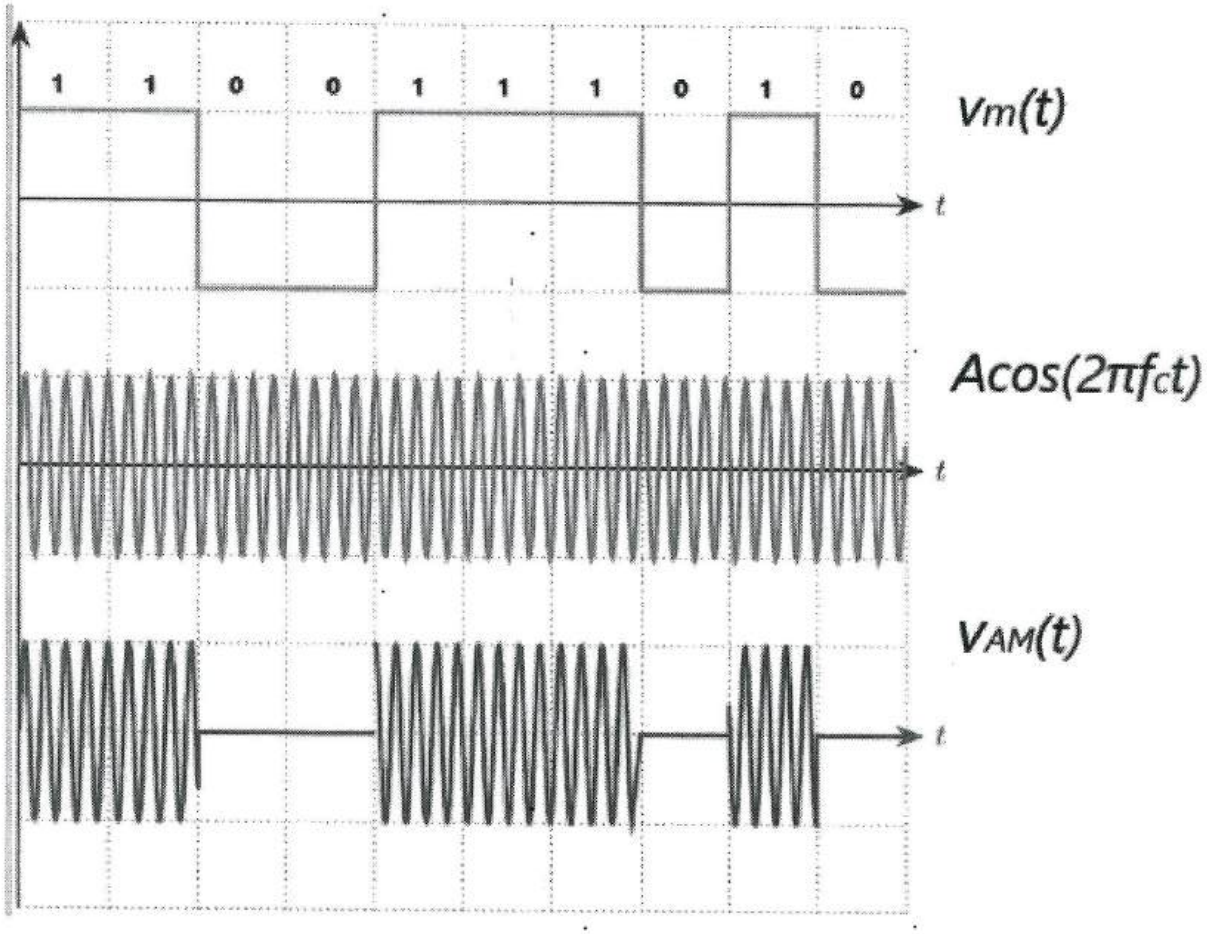


Рис. 2.1 Метод модуляції відкритого ключа

Vm(t) - цифровий сигнал для надсилання, Acos(2πfct) - немодульована несуча, VAM(t) - модульований несучий сигнал OOK. Принцип модуляції OOK використовується для управління однією амплітудою, що дорівнює 0, та іншою, щоб бути відмінною від нуля.

Основні аспекти методу модуляції OOK:

Метод модуляції OOK (On-Off Keying): Це метод, при якому нульовий біт кодується як жодного імпульсу (вимкнено), а одиниця кодується як присутність імпульсу (увімкнено). Він використовується для бездротового зв'язку та в оптичних мережах передачі даних.

Машинне навчання (Machine Learning): Використання нейронних мереж та методів машинного навчання дозволяє адаптивно аналізувати та визначати оптимальні параметри для передачі даних в залежності від умов каналу.

Переваги методу:

Адаптивність до умов каналу: Машинне навчання дозволяє адаптивно налаштовувати параметри модуляції в реальному часі в залежності від змін у каналі передачі даних (наприклад, шум, втрати сигналу, затримки).

Ефективність спектру: Використання методу OOK в поєднанні з машинним навчанням може оптимізувати використання радіоспектру, забезпечуючи оптимальну передачу даних при найменших можливих втратах.

Підвищення продуктивності: Адаптивність модуляції за допомогою машинного навчання дозволяє забезпечити оптимальну продуктивність каналу зв'язку у різних умовах, що підвищує швидкість передачі даних та надійність зв'язку.

Технології MU-MIMO

Технології MU-MIMO дозволяють одночасно використовувати один і той же канал для передачі даних різним користувачам, що підвищує ефективність використання пропускної здатності. [7,2]

Друга хвиля відомого бездротового стандарту 802.11ac wave2 представляє розраховану на багато користувачів технологію з кількома входами (MU-MIMO - multi-user, multi-in multi-out) для підтримки зростаючого числа пристроїв WiFi, що споживають все більше пропускної здатності. Чим більше клієнтських пристроїв підключається до Wi-Fi точки, тим повільніше вона працює. Це пов'язано з тим, що більшість маршрутизаторів і точок доступу можуть спілкуватися лише з одним пристроєм за один раз. За допомогою цих однокористувальних точок доступу/маршрутизаторів (SU-MIMO) кожен пристрій чекає своєї черги для відправки та прийому даних, тому при підключенні нового пристрою лінія та

очікування стають трохи довшими. На рис. 2.2 розглянуто метод модуляції MU-MIMO.

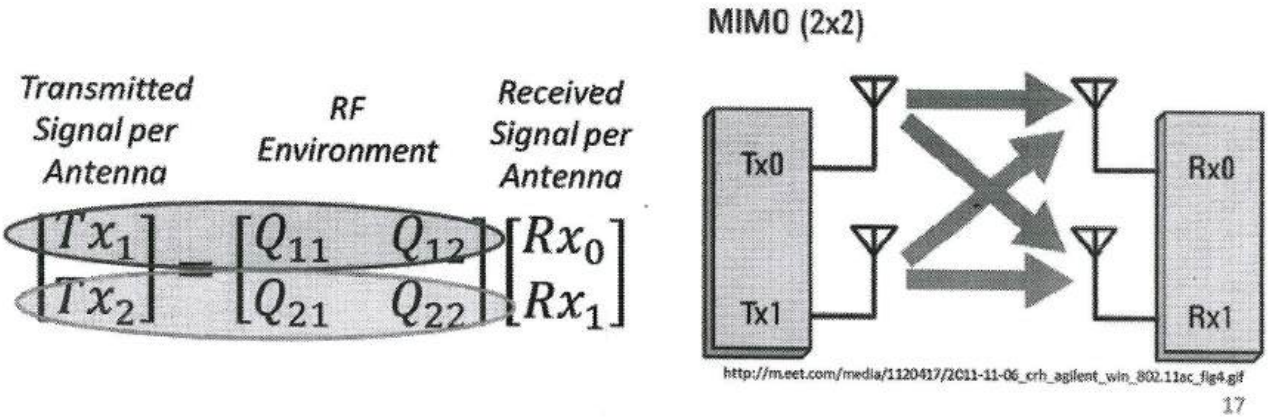


Рис. 2.2 Метод модуляції MU-MIMO

Розрахована на багато користувачів технологія з кількома входами і кількома виходами, більш відома як MU-MIMO (aka Next-Gen AC або AC Wave 2), дозволяє Wi-Fi пристрою взаємодіяти з кількома пристроями одночасно. Це зменшує час, протягом якого кожен пристрій повинен чекати на сигнал і значно прискорює роботу мережі.

Основи MIMO та MU-MIMO

802.11n представив техніку мульти-висновку (MIMO) для підвищення пропускної спроможності WiFi між точками доступу та клієнтськими пристроями. Для роботи MIMO дві бездротові станції, які перебувають у спілкуванні (тобто як точка доступу, так і клієнтський пристрій), повинні мати в кожному випадку кілька радіо/антенних ланцюгів, які ідентичні та фізично відокремлені один від одного фіксованою відстанню, щоб навмисно не збігатися з фазою на довжині робочої хвилі.

У 802.11ac Wave 1 пропускна здатність не тільки покращується за допомогою MIMO, але й використовує інші покращення, у тому числі використання ще більш широких каналів та складнішу схему модуляції та кодування 256-QAM. Однак ці

інші механізми мають обмеження. Загальний розмір лінії 5 ГГц «кінцевий»; в результаті, ширші канали призводять до меншої кількості незалежних каналів і схильні до великих перешкод.

Незважаючи на спроби відкрити більше неліцензованого спектру 5 ГГц для Wi-Fi, канали з частотою 80 МГц, ймовірно, будуть жорсткою практичною межею розміру каналу в майбутньому. Крім того, для нових швидкостей модуляції та кодування 256-QAM (MCS) потрібно мінімальне SNR 37 дБ, що означає, що між пристроями WiFi потрібен дійсно хороший сигнал, який практично можливий тільки на дуже близьких відстанях у дуже чистих радіочастотних середовищах.

Відповідно, ще один спосіб підвищення пропускної спроможності полягає в тому, щоб фактично передавати дані точки доступу на кілька клієнтських пристроїв одночасно, і це те, що стосується розрахованого на багато користувачів MIMO (MU-MIMO).

Однак, щоб зрозуміти, як працює MU-MIMO, важливо спочатку дізнатися про іншу технологію, впроваджену, але не широко реалізовану в 802.11n: формування променя передачі (TxBF). На відміну від MIMO, який посилає інший просторовий потік на кожну антену, передавальна діаграма спрямованості посилає один і той же потік на кількох антена з навмисними зсувами часу збільшення діапазону. Таким чином, для формування променя потрібно використання фазованих антенних грат, в яких є кілька ідентичних антен на фіксованих відстанях поділу щоб бути поза фазою.

Фаза кожного потоку даних передається всіма антенами в різний час (тобто з різними фазовими зміщеннями), які розраховуються так, щоб ці різні сигнали конструктивно втручалися в певну точку в просторі (тобто розташування приймача), тим самим покращуючи рівень сигналу в цьому місці. Сигнал може бути посилено 2x (т. Е. 3 дБ) для кожної фазованої антени.

Основне застереження щодо використання формування променя передачі WiFi у тому, що передавач (тобто точка доступу) повинен знати відносне

становище приймача (тобто клієнтський пристрій). Точка доступу робить це, відправляючи звукові кадри, по суті, незалежні сигнали від кожної зі своїх антен, а потім клієнтський пристрій відповідає матрицею, що вказує, наскільки добре він чув сигнал від кожної антени. Ґрунтуючись на цих матричних даних, АР може обчислити відносне положення клієнтського пристрою та фазові зрушення на кожній зі своїх антен, необхідні для максимізації конструктивних перешкод клієнтського пристрою.

MU-MIMO робить цей процес ефективнішим. Додаючи ще більше радіоланцюгів / антен, він може контролювати фазовану діаграму спрямованості антени для управління областями максимальної конструктивної перешкоди: де сигнал є найбільш сильною та максимальною деструктивною перешкодою, де найслабшою. За наявності достатньої кількості антен та знань про відносні позиції всіх пов'язаних клієнтських пристроїв він може фактично створити поетапний шаблон для спілкування з кількома клієнтами як незалежно, так і одночасно. На рис. 2.3 розглянуто загальний процес MU-MIMO

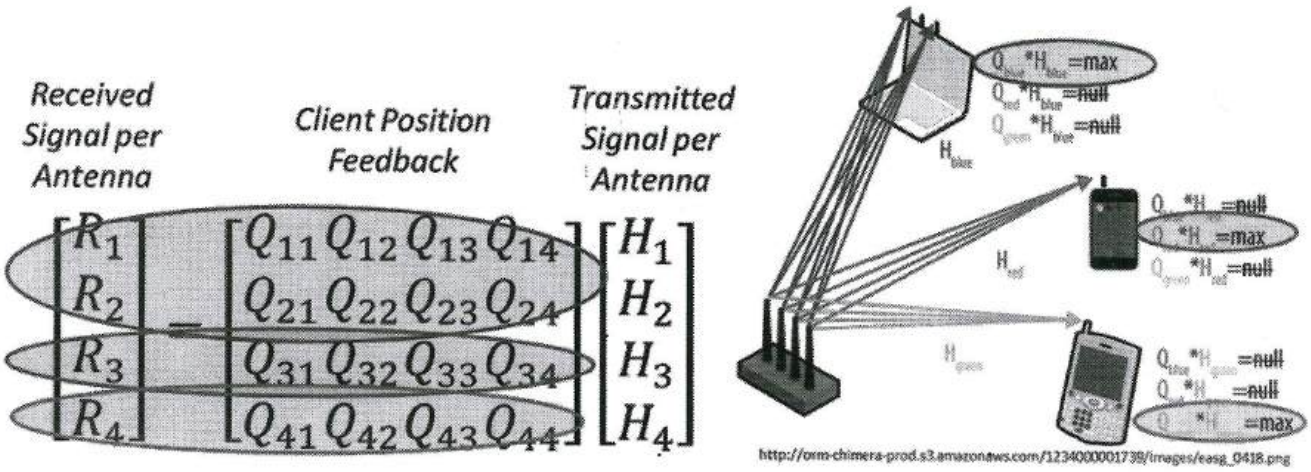


Рис. 2.3 Загальний процес MU-MIMO

Загальний процес для MU-MIMO виглядає так:

1. АР транслює звуковий кадр
2. Кожен клієнтський пристрій, сумісний із MU-MIMO, передає дані зворотної матриці в точку доступу

3. AP обчислює відносне положення кожного пов'язаного з ним MU-MIMO-сумісного клієнтського пристрою
4. AP вибирає групу клієнтських пристроїв для одночасного зв'язку
5. AP обчислює необхідні фазові зрушення для кожного потоку даних кожному клієнту у групі та передає всі потоки даних у групі клієнтів
6. AP відправляє BlockAckRequest кожному клієнтському пристрою в групі окремо, щоб отримати підтвердження щодо того, чи отримав клієнтський пристрій дані
7. AP отримує BlockAck з кожного клієнтського пристрою у групі, яка успішно отримала дані

Максимальна кількість одночасних клієнтів менша, ніж загальна кількість доступних потоків AP. Це математичне обмеження, оскільки AP необхідно контролювати як області максимальних конструктивних перешкод, так і спрямовувати найсильніший сигнал на бажаний клієнтський пристрій, а також області максимальних руйнівних перешкод, щоб мінімізувати сигнал на інших клієнтських пристроях у групі. [7]

Математично кількість змінних перевищує кількість невідомих, тому потік не можна контролювати незалежно. Проте цей останній потік можна налаштувати для вирівнювання з іншим потоком, який може використовуватися для багатопоточних MIMO-клієнтів. Таким чином, для поточного покоління точок доступу 4x4: 4 MU-MIMO, що підтримують 802.11ac Wave 2, діє наступна комбінація груп:

1. Один клієнтський пристрій 3x3: 3 та один клієнтський пристрій потоку 1x1:1
2. Два клієнтські пристрої 2x2: 2
3. Один клієнтський пристрій 2x2: 2 та до двох клієнтських пристроїв 1x1: 1
4. До трьох клієнтських пристроїв 1x1: 1

Обмеження MU-MIMO

MU-MIMO не підтримує зворотну сумісність. Клієнтські пристрої в групі передачі повинні підтримувати механізми зворотного зв'язку 802.11 TxBF, щоб точка доступу могла знати розташування кожного клієнтського пристрою. Хоча TxBF був представлений у 802.11n, більшість клієнтських пристроїв 802.11n та 802.11ac Wave 1 не підтримували механізм зворотного зв'язку. Тільки у нових клієнтських пристроїв 802.11ac є апаратне забезпечення і драйвери, які фактично підтримують цей зворотний зв'язок TxBF. У той час як частка клієнтських пристроїв, що підтримують TxBF, з часом збільшуватиметься в міру оновлення користувачами своїх пристроїв, переваги MU-MIMO можуть бути досягнуті лише в тому випадку, якщо точка доступу та клієнтський пристрій підтримують її.

Час передачі кожного потоку MU-MIMO має бути «однаковим». Це скоріше прагматичне вимога, ніж технічне. Кожен просторовий потік для кожного клієнта може бути переданий за власною швидкістю передачі даних, і кожен потік може мати різні обсяги даних. Оптимальне використання ефірного часу для максимізації пропускної спроможності точки доступу означає, що час передачі просторових потоків для кожного паралельного клієнта має бути однаковим або майже таким.

Це вимагатиме необхідності в аналогічних обсягах даних, що передаються з однаковою швидкістю передачі даних. Перевага MU-MIMO полягає в тому, що AP може говорити одразу з кількома клієнтами, але це, звичайно, означає, що AP хоче одночасно запускати та закінчувати передачі декільком клієнтам для максимальної ефективності. Якщо передача даних одному клієнту займає значно більше часу, ніж інші клієнти групи, більшість переваг ефективності використання часу в ефірі MU-MIMO втрачається.

Відповідно, де MU-MIMO, мабуть, буде найбільш корисним, це середовище з дуже високою пропускною здатністю, наприклад, конференц-центри та стадіони/арени. У цих середовищах пристрої мережі досить однорідні і, отже, їх можливості схожі. Крім того, кількість можливих комбінацій груп передачі є високою, а типи та обсяги даних, що передаються на кожен клієнтський пристрій,

також є однорідними (тобто кілька користувачів використовують свої пристрої аналогічним чином).

Технологія Beamforming та антенні технології

Beamforming - це технологія, що використовується у супутникових системах та бездротових комунікаціях для підвищення ефективності передачі сигналу. Вона базується на використанні групи антен, які працюють спільно для спрямування радіосигналів у певному напрямку або кількох напрямках.

Основні аспекти Beamforming:

Формування променів сигналу: Група антен спільно створює просторові промені (або більше точкованих напрямків), через які передається чи приймається сигнал. Це дозволяє підсилювати сигнал у бажаних напрямках та зменшувати вплив перешкод чи шумів у інших напрямках.

Удосконалення якості сигналу: Beamforming дозволяє підвищити якість сигналу у конкретних зонах, навіть у випадку, коли на деяких ділянках спостерігаються перешкоди чи інтерференція.

Можливість змінювати напрямок без переміщення антени: Завдяки цій технології можна змінювати напрямок передачі/прийому сигналу без фізичного переміщення антени. Це робить системи більш гнучкими та ефективними.

Сигнали, що посилаються антенами, відрегульовані (відкалібровані) таким чином, щоб вони відчували підсилювальну інтерференцію безпосередньо в ділянці приймальної антени абонентського обладнання, в той час як в інших напрямках вони зазнають гасильної інтерференції (під інтерференцією в мережах Wi-Fi розуміють сигнал, що передається іншими пристроями на тому самому чи близькому до нього каналі, на якому мовить цікавить точка доступу, що вас цікавить; інтерференція - один із різновидів перешкод).

Радіосигнали, що приймаються від клієнтів Wi-Fi, допомагають точці доступу визначити місце розташування абонентів, і ця інформація надалі

використовується набором мікросхем точки доступу для розрахунку і формування вузькоспрямованої головної пелюстки в напрямку від точки доступу до клієнтів. Як відомо, що кращий рівень сигналу (вище значення SNR) клієнта, то більшу швидкість можна отримати під час передавання даних із точки доступу на клієнта.

Технологія адаптивного формування діаграми спрямованості дає змогу відкалібрувати в бік клієнта сигнал, що передається, і поліпшити в такий спосіб канал між точкою доступу та клієнтом.

Формування спрямованого променя дає змогу сфокусувати сигнал у напрямку передбачуваного місця розташування конкретного бездротового пристрою (або пристроїв), а не надсилати його випадково в усіх напрямках, що покращує швидкість передавання даних і розширює діапазон. Це допомагає механізму MU-MIMO, який погано працює з пристроями, що швидко рухаються.

Антена, що формує промінь, використовує кілька антенних елементів для управління напрямком хвильового фронту. Змінюючи фазу окремих сигналів в антенній решітці, промінь може бути сформований під потрібним кутом. Потім плоску хвилю можна направити в бажаному напрямку.

Під час наведення результуючого променя на цільову приймальну антену, відстань від кожного елемента антенної решітки до цілі трохи відрізняється. Щоб компенсувати цю різницю, оскільки кожен сигнал від елемента антенної решітки надходить в одній і тій самій фазі, до кожного елемента застосовують фазообертачі, унаслідок чого відбувається когерентне об'єднання і виходить когерентний промінь.

Через підсумовувальні та зменшувальні ефекти об'єднання окремих сигналів у направленій антені (правильно називати такі ефекти конструктивною та деструктивною інтерференцією) результуюча діаграма спрямованості матиме безліч пелюсток з різною напруженістю поля, що спрямовані під різними кутами. Основна пелюстка з найбільшою потужністю є призначеним променем, а менші

бічні пелюстки зазвичай небажані, оскільки вони випромінюють непотрібне випромінювання в непотрібних напрямках.

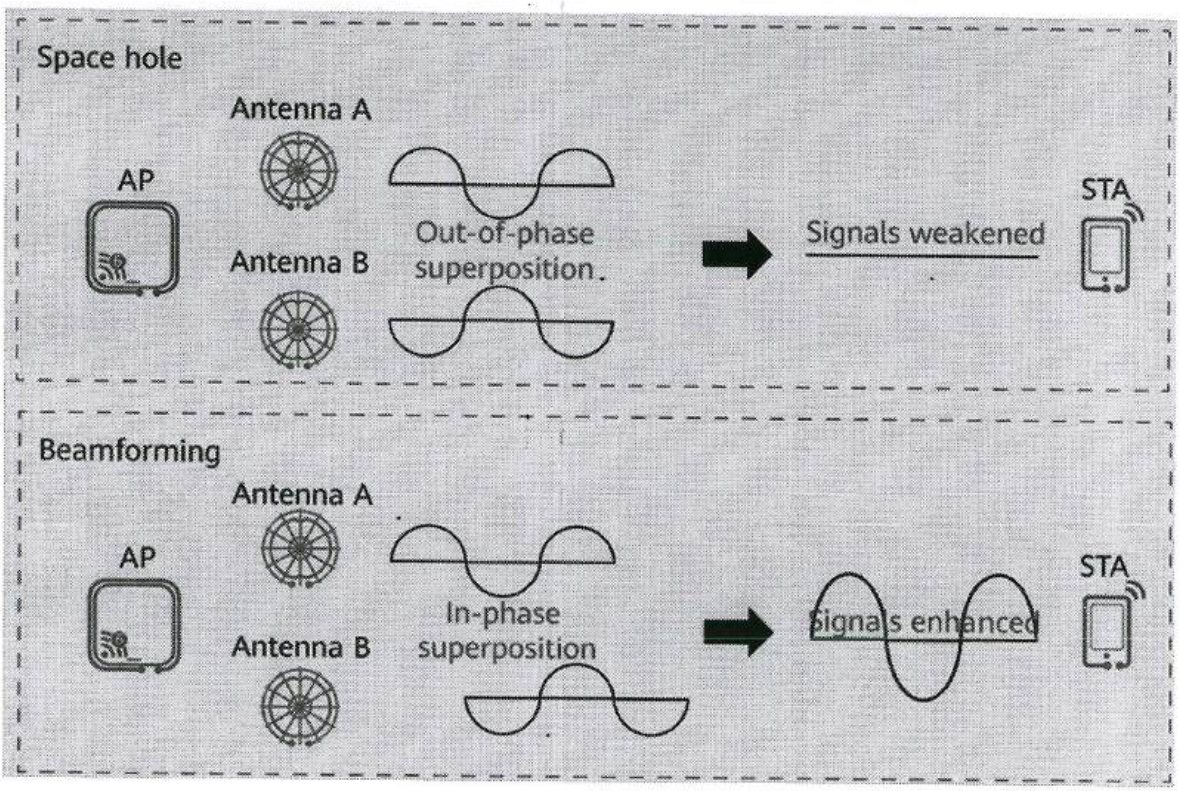


Рис. 2.4 Принцип роботи Beamforming

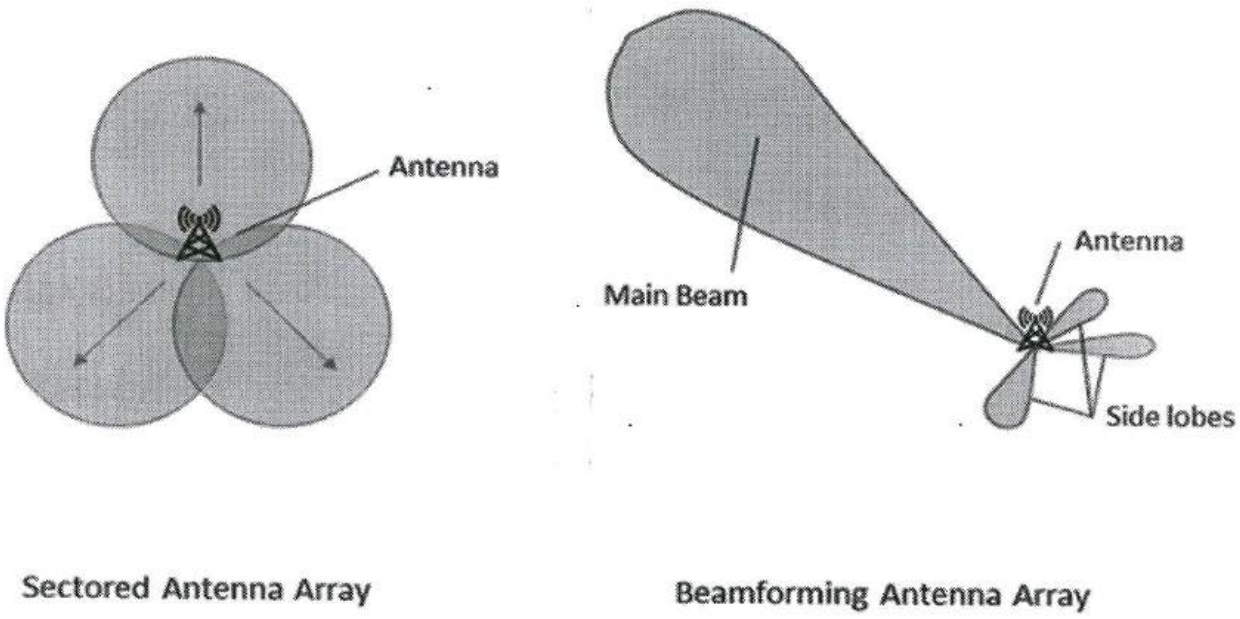


Рис. 2.5 Розповсюдження променю Beamforming

2.2 Зменшення затримок у передачі даних

Методи удосконалення супутникових мереж для зменшення затримок у передачі даних становлять важливу складову для поліпшення продуктивності та ефективності цих систем. Використання нових алгоритмів маршрутизації та оптимізація супутникових кільцевих систем є одним з ключових підходів для досягнення цієї мети.

2.2.1 Використання нових алгоритмів маршрутизації:

Adaptive Routing (Адаптивна маршрутизація): Цей метод використовує алгоритми, які адаптують маршрути в залежності від умов мережі. Наприклад, алгоритми, які обирають маршрути на основі поточного навантаження мережі, шляхів з меншою затримкою або з меншою ймовірністю втрат пакетів даних. [5,7]

Адаптивна маршрутизація (Adaptive Routing) є стратегією в комп'ютерних мережах, яка використовується для вибору оптимального шляху передачі даних з одного вузла до іншого. Основна ідея полягає в тому, щоб мережа могла адаптувати свою маршрутизаційну таблицю чи протокол маршрутизації у відповідь на змінні умови мережі, такі як зміни витрат, затримки, надійність шляху та інші параметри.

Основні характеристики та принципи роботи Adaptive Routing:

Динамічність маршрутизації: Адаптивна маршрутизація працює на основі динамічних алгоритмів, які автоматично адаптують маршрути відповідно до змін у мережі. Це дозволяє мережі реагувати на змінні умови безпосередньо у реальному часі.

Принцип динамічності полягає у тому, що мережа може автоматично змінювати маршрути передачі даних, реагуючи на різноманітні фактори та умови мережі. Ось як вона працює:

Виявлення змін: Методи адаптивної маршрутизації моніторять стан мережі, включаючи пропускну здатність, затримки, відмови обладнання тощо. Ці методи можуть виявляти зміни, які впливають на маршрутизацію.

Оцінка оптимального маршруту: Залежно від отриманих даних про стан мережі, алгоритми адаптивної маршрутизації приймають рішення щодо оптимального шляху передачі даних. Це може бути шлях, який забезпечує найменшу затримку, найбільшу пропускну здатність або інші параметри, враховуючи актуальні умови мережі.

Автоматична зміна маршруту: Після виявлення змін у мережі і визначення нового оптимального маршруту, адаптивна маршрутизація автоматично оновлює таблиці маршрутизації в усіх вузлах мережі.

Сповіщення вузлів: Коли маршрут змінюється, вузли у мережі повідомляють один одного про ці зміни, щоб усі вони користувалися актуальною інформацією про маршрути.

Цей процес дозволяє мережі автоматично адаптуватися до змінних умов, забезпечуючи оптимальний шлях передачі даних і підтримуючи продуктивність та надійність зв'язку у різних умовах експлуатації.

Збір та обмін інформацією: В мережі вузли обмінюються інформацією про стан мережі, таку як відстані, витрати на передачу даних, стан лінків, інші параметри. Ця інформація використовується для оновлення маршрутизаційних таблиць.

Алгоритми адаптивної маршрутизації потребують збору та обміну інформацією між вузлами мережі для прийняття рішень щодо оптимального маршруту передачі даних. Деталізація процесу збору та обміну інформацією в Adaptive Routing:

Збір інформації:

- Стан мережі: Кожен вузол системи збирає дані про стан мережі, такі як пропускна здатність, затримки, відмови чи навантаження, які впливають на маршрутизацію.

- Таблиці маршрутизації: Кожен вузол підтримує таблиці маршрутизації, які містять інформацію про доступні маршрути до інших вузлів у мережі та метрики якості кожного маршруту.

Обмін інформацією:

- Пакети маршрутизації: Вузли періодично обмінюються пакетами маршрутизації, що містять інформацію про їх власний стан та стан сусідніх вузлів.
- Протоколи обміну: Алгоритми адаптивної маршрутизації використовують різні протоколи для обміну інформацією, такі як RIP (Routing Information Protocol), OSPF (Open Shortest Path First) або BGP (Border Gateway Protocol), щоб передавати дані про маршрути та їх метрики між вузлами.

Оновлення таблиць маршрутизації:

- Аналіз та обробка: При отриманні пакетів маршрутизації вузли аналізують цю інформацію та оновлюють свої таблиці маршрутизації згідно з найкращими маршрутами на основі отриманих даних.
- Інструкції маршрутизації: На основі оновлених таблиць маршрутизації вузли визначають оптимальний шлях для передачі даних до певного пункту мережі.

Цей процес постійно повторюється для підтримки актуальності та ефективності маршрутів у мережі, щоб забезпечити оптимальну передачу даних у різних умовах мережі.

Оптимальність маршрутів: Алгоритми адаптивної маршрутизації стараються знаходити найоптимальніший шлях для передачі даних, враховуючи різні параметри, такі як швидкість передачі, відстань, надійність тощо.

Оптимальність маршрутів у Adaptive Routing полягає у виборі найкращого шляху для передачі даних між вузлами мережі з урахуванням різноманітних

параметрів, таких як пропускна здатність, затримки, навантаження та інші фактори. Ось як це працює:

Оцінка параметрів маршруту:

Кожен вузол у мережі збирає інформацію про параметри мережі, такі як пропускна здатність, затримки, відмови тощо, для всіх доступних маршрутів до конкретного вузла.

Визначення оптимальності:

На основі зібраної інформації алгоритми адаптивної маршрутизації оцінюють різні маршрути та їх якість з урахуванням цих параметрів.

Вибір найкращого маршруту:

Після оцінки всіх параметрів маршрутів, вузли мережі обирають той маршрут, який відповідає оптимальним критеріям, таким як найбільша пропускна здатність, найменша затримка або інші метрики ефективності, враховуючи актуальний стан мережі.

Актуалізація маршруту:

Якщо умови в мережі змінилися (наприклад, пропускна здатність зменшилася або з'явилися нові маршрути), алгоритми адаптивної маршрутизації переоцінюють та можуть змінити вибраний маршрут для забезпечення оптимальної передачі даних.

Адаптація до змін: Основна перевага полягає у здатності мережі змінювати маршрути відповідно до змін в умовах мережі, таких як відмови обладнання, переповнення каналів, втрати пакетів та інші події.

Протоколи та алгоритми Adaptive Routing:

Distance Vector (Вектор відстаней): Протокол, який оновлює інформацію про відстані до всіх вузлів у мережі і обирає шлях на основі мінімальної відстані.

Distance Vector: Цей протокол розповсюджує інформацію про відстані до всіх вузлів у мережі, оновлюючи свою таблицю маршрутизації з урахуванням мінімальної відстані до кожного вузла. У векторі відстаней кожен вузол обмінюється інформацією зі своїми безпосередніми сусідами, щоб дізнатися про відстані до інших вузлів у мережі. Протокол вибирає найбільш оптимальний шлях на основі цієї мінімальної відстані. [8]

Переваги:

- Простий у втіленні та роботі.
- Ефективний для невеликих мереж.
- Використовує менше обчислювальних ресурсів.

Недоліки:

- Проблеми зі збільшенням часу збереження маршрутної таблиці.
- Проблеми зі збереженням у мережах з багатою топологією або частими змінами.

Link State (Стан зв'язків): Цей протокол збирає і розповсюджує інформацію про стан кожного лінку у мережі, визначаючи оптимальний шлях на основі цієї інформації.

Link State: У цьому протоколі кожен вузол в мережі збирає і розповсюджує інформацію про стан своїх лінків (зв'язків) у мережі. Зібрані дані про стан зв'язків використовуються для побудови графа мережі, після чого алгоритм маршрутизації обчислює найоптимальніший шлях до кожного вузла у мережі на основі цієї інформації.

Переваги:

- Швидкість у виявленні найоптимальніших маршрутів.
- Зберігає точну картину мережі.
- Ефективний у великих мережах.

Недоліки:

- Вимагає більше обчислювальних ресурсів та пам'яті.
- Складніший у впровадженні та підтримці.
- Проблеми зі шкалуванням у великих та динамічних мережах.

Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV): Це протокол маршрутизації, який шукає маршрути лише в той момент, коли вони потрібні для конкретної передачі даних. [8]

Ad Hoc On-Demand Distance Vector: Це протокол маршрутизації, який використовується для мереж без централізованого контролю (адгок), де вузли співпрацюють для визначення оптимального маршруту лише тоді, коли це потрібно для конкретної передачі даних. Коли вузлу потрібно відправити дані, він використовує AODV для пошуку маршруту до пункту призначення через вузли-посередники. [8]

Переваги:

- Швидкість у виявленні маршруту за потребою.
- Ефективний у мобільних або адгок мережах.
- Можливість роботи у великих мережах зі значними змінами топології.

Недоліки:

- Підвищена кількість повідомлень у мережі для встановлення маршруту.
- Вища залежність від контролю мережі, що може привести до збільшення навантаження.

Multipath Routing (Мультишляхова маршрутизація): Використання кількох шляхів для передачі даних може знизити загальну затримку, оскільки дозволяє використовувати оптимальний шлях у конкретний момент часу. [10,11]

Мультишляхова маршрутизація (Multipath Routing) - це стратегія в комп'ютерних мережах, яка передбачає використання не одного, а кількох маршрутів для передачі даних від відправника до отримувача.

Основні характеристики та принципи роботи:

Використання кількох шляхів: Замість використання лише одного шляху до вузла призначення, мультишляхова маршрутизація дозволяє використовувати кілька альтернативних маршрутів. Це може бути використано для підвищення надійності передачі даних або для розподілу трафіку між різними шляхами для підвищення загальної продуктивності мережі.

Використання кількох шляхів у Multipath Routing передбачає розподіл трафіку між різними маршрутами, щоб покращити пропускну здатність, надійність та ефективність мережі. Ось як працює цей підхід:

Виявлення доступних маршрутів:

Multipath Routing визначає кілька можливих маршрутів до призначення, що можуть бути використані для передачі даних. Ці маршрути можуть бути альтернативними шляхами через різні вузли мережі.

Розподіл трафіку:

Замість використання лише одного маршруту, Multipath Routing розподіляє трафік між кількома альтернативними маршрутами. Це може бути реалізовано шляхом використання різних маршрутів для різних частин одного потоку даних або для різних потоків взагалі.

Використання ресурсів:

Кожен з обраних маршрутів може проходити через різні сегменти мережі чи використовувати різні технічні можливості. Multipath Routing дозволяє мережі використовувати доступні ресурси більш ефективно, забезпечуючи балансування навантаження між маршрутами.

Надійність мережі:

Використання кількох шляхів дозволяє мережі бути більш стійкою до відмов чи перешкод на шляхах передачі даних. Якщо один з маршрутів стає недоступним, система може автоматично переключитись на інший маршрут, що забезпечує неперервність зв'язку.

Балансування трафіку:

Multipath Routing дозволяє розподіляти навантаження між різними шляхами, що може підвищити пропускну здатність та ефективність мережі загалом.

Цей підхід дозволяє оптимізувати використання мережевих ресурсів, підвищити надійність зв'язку та забезпечити більш ефективне розподілення трафіку в мережі.

Динамічність: Мультишляхова маршрутизація може бути динамічною, тобто мережа може переключатися між різними маршрутами в залежності від умов мережі. Це дозволяє мережі адаптуватися до змінних умов, таких як перебої в лініях зв'язку чи перевантаження каналів.

Динамічність у Multipath Routing відноситься до здатності мережі адаптуватись до змінних умов і вибирати оптимальні маршрути в реальному часі. Ось деякі аспекти його функціонування:

Стан мережі:

Алгоритми Multipath Routing активно моніторять стан мережі, збираючи інформацію про пропускну здатність, затримки, відмови вузлів тощо. Ця інформація постійно оновлюється для кожного маршруту.

Адаптація до змін:

Коли стан мережі змінюється (наприклад, через відмови вузлів або зміну умов передачі), алгоритми Multipath Routing можуть переоцінити вибрані маршрути та змінити їх для забезпечення ефективної передачі даних.

Перехід між шляхами:

Якщо один з обраних маршрутів стає недоступним або неефективним, система автоматично може переключити передачу даних на інший доступний маршрут без втрати зв'язку.

Вибір оптимального маршруту:

З огляду на актуальний стан мережі, алгоритми Multipath Routing вибирають оптимальні маршрути для передачі даних, з урахуванням різних параметрів, таких як швидкість передачі, навантаження мережі та найменші затримки.

Динамічне оновлення маршрутів:

Збір та аналіз інформації про стан мережі в реальному часі дозволяє Multipath Routing постійно оновлювати і адаптувати маршрути для оптимальної передачі даних в залежності від умов мережі.

Балансування навантаження: Використання різних шляхів дозволяє рівномірно розподіляти навантаження між ними. Це може покращити швидкість передачі даних та забезпечити кращу ефективність мережі в цілому.

Балансування навантаження в Multipath Routing полягає в розподілі трафіку між різними шляхами таким чином, щоб забезпечити оптимальне використання ресурсів мережі. Ось як це працює:

Вибір маршрутів:

Multipath Routing обирає кілька можливих маршрутів для передачі даних між вузлами мережі. Ці маршрути можуть мати різні характеристики, такі як пропускна здатність, затримки чи відстань.

Розподіл трафіку:

Механізми Multipath Routing розподіляють навантаження між обраними маршрутами. Це може включати в себе розподіл різних частин одного потоку даних по різних маршрутах або навіть використання різних маршрутів для різних потоків даних.

Урахування стану мережі:

Система Multipath Routing стежить за станом мережі, включаючи пропускну здатність кожного маршруту та його поточне навантаження. На основі цих даних система може рішати, як розподілити трафік між різними шляхами.

Адаптивність до змін:

У випадку зміни умов мережі або навантаження на певний маршрут, система може динамічно змінювати розподіл трафіку для забезпечення оптимального використання доступних ресурсів.

Оптимізація використання ресурсів:

Балансування навантаження дозволяє максимально використовувати пропускну здатність різних маршрутів, уникати перевантаження одних і недоексплуатації інших.

Використання резервних шляхів: В разі виникнення проблеми з одним із шляхів передачі, мультишляхова маршрутизація дозволяє використовувати інший доступний шлях для забезпечення неперервності передачі даних.

Використання резервних шляхів у Multipath Routing відноситься до забезпечення резервних або альтернативних маршрутів для передачі даних в разі виникнення проблем або відмов на основному шляху. Принцип роботи:

Стан мережі та резервні маршрути:

Multipath Routing визначає декілька альтернативних маршрутів для передачі даних. Ці маршрути можуть бути визначені заздалегідь на основі статичних параметрів або розраховуватись динамічно на основі стану мережі.

Моніторинг стану мережі:

Система постійно моніторить стан мережі, виявляючи проблеми, такі як відмови вузлів чи збої в передачі даних на основному шляху.

Автоматичний перехід на резервний шлях:

У випадку виникнення проблем або відмови на основному маршруті, система може автоматично переключити передачу даних на один з резервних маршрутів.

Збереження неперервності зв'язку:

Використання резервних шляхів дозволяє уникнути втрати зв'язку або зниження якості зв'язку. Система переключає передачу даних на альтернативний маршрут, забезпечуючи неперервність передачі.

Переоцінка маршрутів:

Після відновлення основного маршруту або усунення проблеми, система може повернутися до основного шляху або змінити резервний маршрут на основі нової інформації про стан мережі.

Використання резервних шляхів у Multipath Routing дозволяє забезпечити надійність та неперервність зв'язку, реагуючи на проблеми, які можуть виникнути у мережі, та автоматично переключатись на альтернативні маршрути для передачі даних.

Алгоритми мультишляхової маршрутизації:

Equal-Cost Multipath (ECMP): Цей алгоритм розподіляє трафік рівномірно між кількома шляхами з однаковими вартостями (метриками).

Цей алгоритм використовується для розподілу трафіку між кількома маршрутами з однаковою вартістю (або метрикою), тобто маршрутами, які мають однакову відстань чи кількість стрибків. У реальному часі маршрутизатор вибирає шлях для пакета на основі хеш-функцій, що розподіляють пакети між доступними варіантами маршрутів.

Переваги:

- Простота реалізації і підтримки.
- Діаграми можуть бути розподілені без пропуску маршруту у випадку, коли вони мають однакову вартість.

Недоліки:

- Не завжди можливо мати шляхи однакової вартості, особливо у складних мережах.

Source Routing:

Source Routing: Відправник визначає повний шлях, який повинні використовувати пакети даних, і вказує його у заголовку кожного пакета.

Цей метод вимагає, щоб відправник визначив маршрут, яким мають йти його пакети, та включив цю інформацію в заголовок пакету. Кожен маршрутизатор під час пересилання пакету використовує цю інформацію для визначення наступного кроку у його маршруті.

Переваги:

- Гнучкість і можливість вказати конкретний маршрут для кожного пакету.
- Відсутність необхідності визначати маршрути в реальному часі.

Недоліки:

- Більш складне управління, оскільки потрібно активно вказувати шляхи для кожного пакету.
- Більший розмір пакету через додаткову інформацію в заголовку.

Dynamic Multipath Routing: Алгоритми, які динамічно визначають оптимальні шляхи в залежності від стану мережі, такі як Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) чи Optimized Link State Routing (OLSR).

Це сімейство алгоритмів, які активно розподіляють трафік між різними шляхами в залежності від змінних умов мережі. Наприклад, AODV шукає маршрути лише тоді, коли вони потрібні для конкретної передачі, тоді як OLSR створює маршрути на основі стану лінків у мережі.

Переваги:

- Адаптивність до змін у мережі та здатність реагувати на зміни маршрутів у реальному часі.
- Можливість використовувати оптимальні шляхи в залежності від поточних умов мережі.

Недоліки:

- Більше обчислювальних ресурсів для визначення та підтримки динамічних шляхів.
- Потенційна складність реалізації та налаштування.

3 МОДЕЛІ РОЗВИТКУ СУПУТНИКОВИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПОБУДОВИ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

3.1 Удосконалення моделі розвитку супутникової мережі Starlink методами використання нових алгоритмів маршрутизації

Основні відомості про Starlink

Загальні відомості про висоті орбіт та кількість супутників

Говорячи про склад низькоорбітального угруповання Starlink компанії SpaceX, треба зазначити, що він складається як мінімум із двох окремих супутникових мереж. Перша мережа (Таблиця 3.1) спочатку (згідно з заявкою SpaceX в FCC від 15 листопада 2016 р.) планувалася з 4425 супутників. Ця заявка схвалена FCC 29 березня 2018 р. [6]

Таблиця 3.1 Перша мережа Starlink

Висота орбіти, км	Нахил орбіти, градуси	Кількість орбіт/площин з нахилом	Кількість супутників у всіх площинах
1150	53	32	50
1110	53,8	32	50
1130	74	8	50
1275	81	5	75
1325	70	6	75

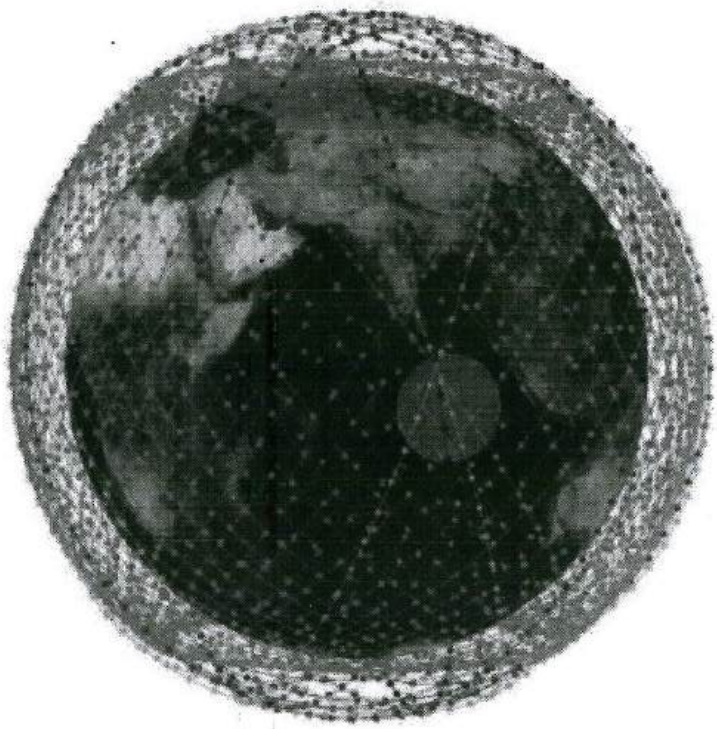


Рис. 3.1 Зона покриття Starlink

Друга мережа з 7518 супутників повинна буде працювати у V-діапазоні (заявку подано 1 березня 2017 р., схвалено 19 листопада 2018 р.).

Таблиця 3.2 Основні відомості про супутники Starlink у першій мережі

Кількість супутників на орбіті	2,547	2,478	2,493
Висота орбіти, км	345,6	340,8	335,9
Нахил, град.	53	48	42

Потім SpaceX вносила зміни у 2018 році, знизивши орбіту до 550 км. У таблиці нижче наведено склад угруповання, згідно з останньою заявкою SpaceX у FCC (Федеральну комісію по зв'язку США) 17 квітня 2020 р.

Таблиця 3.3 Основні відомості про супутники

Кількість орбіт	72	72	36	6	4
Кількість супутників	22	22	20	58	43
Висота орбіти, км	550	540	570	560	560
Нахил, град.	53	53,2	70	97,6	97,6

Також слід сказати, що на початку червня 2020 року SpaceX направила до FCC ще одну заявку, з назвою «Generation 2», згідно з якою планується ще майже 30 тис. супутників на наступних орбітах:

Таблиця 3.4 Generation 2

Висота орбіти, км	Нахил, град.	Кількість орбіт/площин з нахилом	Кількість супутників у всіх площинах
328	30	1	7178
334	40	1	7178
345	53	1	7178
360	96,9	40	50
373	75	1	998
499	63	1	4000
604	148	12	12
614	115,7	18	18

На даний момент SpaceX бачить її в наступному вигляді: 72 орбітальні площини з нахилом 53 градуси по 22 супутники в кожній на висоті 550 кілометрів (можливо, що це не остаточний варіант).

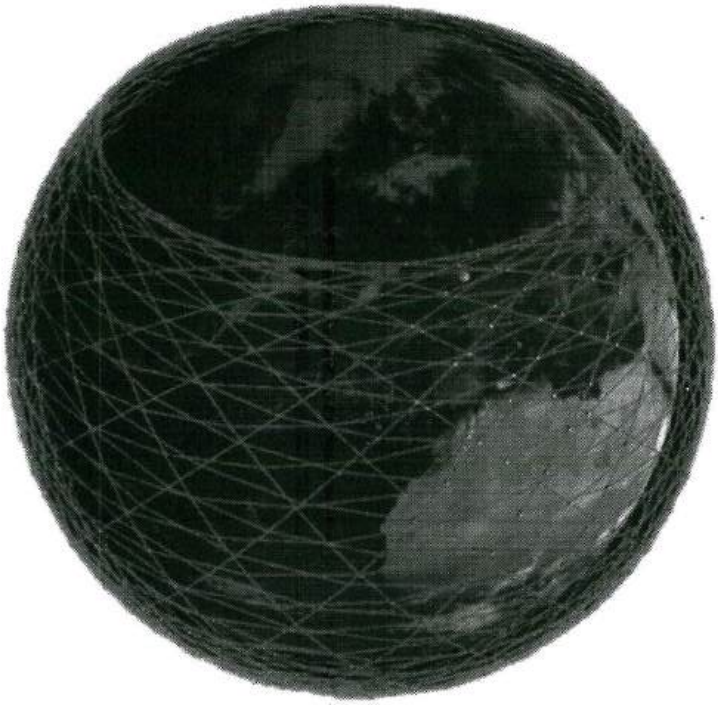


Рис.3.2 Архітектуру мережі Starlink

На рисунку 3.2 зображено архітектуру мережі Starlink та її найважливіші компоненти, а саме:

Космічний сегмент - це супутники на низькій орбіті (на даний момент розгортаються перші 1600 супутників на орбіті висотою 550 км із нахиленням 53 градуси);

Наземний сегмент:

Центр управління мережею (Network Management System),

Шлюзові станції (Gateway),

Абонентський термінал (User Terminal)

Щодо наземної мережі, то, напевно, вона побудована на мережі Google. На саму SpaceX зареєстровано дві автономні мережі - AS14593 і AS27277. Судячи з наявних даних, трафік абонентів SpaceX маршрутизуватиметься орендованим ВОЛЗ на найближчі вузли/точки обміну трафіком у США:

LAX (Лос Анджелос), SEA (Сіетл), ORD (Орландо), LGA (Нью-Йорк), SJC (Сан-Хосе), DFW (Даллас), IAD (Вашингтон).

За даними на 2.11.2020 SpaceX має IP-адреси Австралії, Нової Зеландії, Канади, Великобританії, Німеччини та Іспанії, зареєстровані в AS (автономна система, по суті, ідентифікатор провайдера, під яким зареєстровані IP-адреси). AS36492 використовується Google під назвою "GOOGLEWIFI" для запуску загальнодоступних точок доступу Wi-Fi, але також використовується Starlink для своїх IP-адрес).

Основним корисним навантаженням супутника Starlink є 2 антенні комплекси для зв'язку зі шлюзовими станціями та з абонентськими терміналами.

Антенний комплекс для зв'язку з гейтвеями (або фідерна лінія) є параболічні антени, що наводяться в процесі польоту на точку Землі, де знаходиться гейтвей. Фідерна лінія працює у Ка-діапазоні (18/30 ГГц).

Таблиця 3.5 Діапазони частот та одиниці поляризації, що використовуються системою SpeceX для спеціальних послуг

Вид каналу зв'язку та направлення прийом-передача	Діапазони частот, ГГц	Мгц в одній поляризації
Послуга: Вниз на абонентський термінал	10,7-12,7	2000
Послуга: Вниз на Гейтвей	17,8-18,6 18,8-19,3	800 500
Послуга: Вверх від абонентського терміналу	14,0-14,5	500
Послуга: Вверх від Гейтвея	27,5-29,1 29,5-30,0	1600 500
Телеметрія та управління вниз	12,15-12,25 18,55-18,60	100 50
Телеметрія та управління вверх	13,85-14,00	150

Як випливає з таблиці 3.5, у розпорядженні супутника є 2000 МГц у напрямі від станції шлюзи до супутника і 1600 МГц у зворотному напрямку. При використанні обох варіантів поляризації (лівої та правої у разі кругової) це дозволяє використовувати для передачі трафіку максимум 4200 МГц від гейтвею на супутник та 2600 МГц у зворотному напрямку.

Друге покоління Starlink

На відміну від першого покоління, абонентський термінал у Gen2 працюватиме не тільки в Ku (11/14 Ггц), а й у Ка (18/30 Ггц). При цьому абонентські термінали для першого покоління працюватимуть і з ІСВ другого покоління. [6]

Ось частоти першого покоління Starlink:

Таблиця 3.6 Діапазони частот, що використовуються системою SpeceX

Тип каналу та напрямок передачі	Частотні діапазони
Термінал "Супутник-Користувач"	10,7-12,7 Ггц
Перехід від супутника до шлюзу	17,8-18,6 Ггц 18,8-19,3 Ггц
Користувач-Супутник	14,0-14,5 Ггц
Перехід від шлюзу до супутника	27,5-29,1 Ггц 29,5-40,0 Ггц
Телеметрія та управління вниз	12,15-12,25 Ггц 18,55-18,60 Ггц
Телеметрія та управління верх	13,85-14,00 Ггц

Таблиця 3.7 Діапазони частот, що використовуються системою SpeceX Gen2

Тип каналу та напрямок передачі	Частотні діапазони
Термінал "Супутник-Користувач"	10,7-12,7 Ггц 17,8-18,6 Ггц 18,8-19,3 Ггц 19,7-20,2 Ггц
Перехід від супутника до шлюзу	17,8-18,6 Ггц 18,8-19,3 Ггц 71,0-76,0 Ггц
Користувач-Супутник	12,75-13,25 ГГц 14,0-14,5 Ггц 28,35-29,1 Ггц 29,5-30,0 Ггц
Перехід від шлюзу до супутника	27,5-29,1 Ггц 29,5-30,0 Ггц 81,0-86,0 Ггц
Телеметрія та управління вниз	12,15-12,25 Ггц 18,55-18,60 Ггц
Телеметрія та управління верх	13,85-14,00 Ггц

Ку-діапазон ділиться на 2 частини для сервісів BSS Broadcast Satellite Service (телевізійне мовлення) та FSS Fixed Satellite Service (супутниковий зв'язок), це в сумі від 10700 МГц до 12700 МГц. Разом 2000 Мгц за напрямком від ШСЗ до абонента. У Gen2 до 2000 МГц у Ku додається ще й 1800 Мгц у Ка-діапазоні.

Для того, щоб «підняти» з Землі на супутник вдвічі більше інформації, SpaceX вирішив використовувати на гейтвеях новий (ніколи раніше не використовувався в супутниковому зв'язку) Е-діапазон частот - це 81-86 Ггц (або 71-76 Ггц у зворотному напрямку). Тут для Fixed Satellite Service (супутниковий зв'язок) можна використовувати не 500 МГц як Ku, а в 10 разів більше – 5000 МГц.

Треба відзначити, що зараз у США цей діапазон використовується тільки для організації наземних РРЛ (радіорелейних ліній) радіомостів (радіоканалів між вежами), всього в США лише близько 19000 таких пристроїв. SpaceX має вибирати місця для своїх гейтвеїв так, щоб не ставити перешкоди цим радіомостам.

Порівняно з першим поколінням ШСЗ, на кожному з яких можлива робота 8 окремих променів від ШСЗ у бік Землі, на другому поколінні їх буде більше (30 променів, що працюють на прийом (з них 2 промені для управління та телеметрії) та 32 промені на передачу (2 телеметрія та управління)). Ця кількість сервісних променів ділиться на фідерні (між ШСЗ та гейтвеєм) та сервісні (між ШСЗ та абонентським терміналом).

Завдяки цьому кожен ШСЗ другого покоління матиме у 3 (три) рази більше пропускну здатність, ніж супутник першого покоління.

Абонентський термінал може приймати сигнал декількох окремих променів сумарною пропускною здатністю до 2000 МГц (еквівалентна швидкість не менше 6 Гб) і передавати в смузі до 125 МГц (еквівалентна швидкість не менше 125 Мбіт).

У кожному пуску ШСЗ Starlink SpaceX використовує по 4 складання для кріплення ШСЗ під обтічником, кожна збірка складається з 2 алюмінієвих легких штанг завдовжки 6 метрів та діаметром 1,5 дюйма. Час життя цих штанг на орбіті трохи більше 36 днів, а ймовірність зіткнення з будь-яким іншим об'єктом дорівнює 0.0000000653.

Для захисту від космічного сміття та мікрометеоритів усі важливі елементи ШСЗ захищені алюмінієвим екраном завтовшки 1 мм. При цьому навіть якщо екран і баки з криптоном будуть пробиті, це не викличе вибуху та утворення уламків діаметром більше 1 мм.

Багато бортових приймачів командної радіолінії, передавачів телеметрії та електроніки, що управляє ШСЗ, резервовані для запобігання втраті управління ШСЗ у польоті. Розрахунки за власною методикою SpaceX показують, що

ймовірність втрати управління ШСЗ через зіткнення з космічним сміттям діаметром понад 1 мм становить 0.000776 за весь період роботи ШСЗ.

Для зменшення перешкод в астрономічних спостереженнях, супутники другого покоління будуть: по-перше, повертатися навколо своєї осі в момент руху на робочу орбіту, а по-друге, їх сонячні батареї будуть складатися особливим чином. Обидві ці заходи дозволять забезпечити, що час, коли поїзд із запущених ШСЗ може бути помічений спостерігачем із Землі (без телескопа), менше тижня. Ще на цих ШСЗ буде використано спеціальне покриття для зменшення Альбедо на 55% та козирок для сонячного світла. Також менша висота орбіти супутників 2-го покоління забезпечить, що швидше залишати кут спостереження Астрономами, ніж ШСЗ, що є більш високих орбітах.

Завдяки великій кількості ШСЗ на видимій для абонентського терміналу ділянці неба, термінал зможе вибирати для роботи ті ШСЗ, які незатінені для нього деревами або вищими будинками, тобто система отримає дуже високу гнучкість. Крім того, система 2-го покоління буде мати Штучний Інтелект, що дозволяє їй відключати/вибирати для роботи з конкретним абонентом ті промені/ШСЗ, які не ставлять перешкоди іншим системам на низькій або геостаціонарній орбіті.

SpaceX повідомляє, що досягла угоди з Урядовими агентствами США (у тому числі і Міністерством Оборони) про спільне використання Ка-діапазону, і впевнена, що зможе досягти угоди і для використання цього діапазону супутниками Gen2.

Удосконалення моделі Starlink методом використання алгоритму маршрутизації Adaptive Routing (Адаптивна маршрутизація)

Застосування Adaptive Routing може мати значний вплив на цю систему:

Ефективне управління трафіком: Adaptive Routing може допомогти системі Starlink автоматично адаптувати шляхи маршрутизації залежно від навантаження та умов мережі. Це може забезпечити більш ефективне розподілення трафіку між супутниками та приземними станціями.

Adaptive Routing у системі Starlink може мати значний вплив на ефективне управління трафіком, сприяючи автоматичному адаптуванню маршрутів передачі даних у залежності від навантаження та умов мережі. Ось деякі аспекти, які варто розглянути:

Динамічне налаштування маршрутів: Adaptive Routing дозволяє системі Starlink змінювати маршрути передачі даних в реальному часі залежно від умов мережі. Це означає, що при зміні трафіку чи заторах мережа може автоматично перенастроювати шляхи передачі даних для оптимальної продуктивності.

Балансування трафіку: Алгоритми Adaptive Routing можуть допомогти розподілити трафік між супутниками та приземними станціями Starlink таким чином, щоб уникнути перевантаження певних частин мережі. Це може покращити швидкість та ефективність передачі даних.

Адаптація до змінних умов мережі: Швидкість, затримки та доступність різних сегментів мережі Starlink можуть коливатися через різні фактори, такі як погодні умови чи інші перешкоди. Adaptive Routing дозволяє мережі швидко реагувати на ці зміни та пристосовувати маршрути для оптимальної передачі даних.

Неперервність зв'язку: Застосування Adaptive Routing допомагає Starlink створювати та зберігати резервні маршрути для передачі даних. Це може забезпечити неперервність зв'язку у разі відмови чи проблем на основних маршрутах.

Оптимальне використання ресурсів: Шляхи передачі даних можуть оптимізуватися, щоб використовувати доступні ресурси Starlink максимально ефективно, забезпечуючи кращу продуктивність та швидкість зв'язку.

Враховуючи динамічність та широкий охоплення мережі Starlink, застосування Adaptive Routing може сприяти покращенню її ефективності та надійності.

Опис ефективності Starlink до та після використання алгоритму Adaptive Routing:

Ефективність Starlink до використання Adaptive Routing:

Розподіл трафіку: Маршрутизація трафіку може бути менш оптимізованою, особливо в умовах змінного навантаження чи змін у мережі.

Затримки та швидкість: Можливі затримки та високі часи відповіді можуть виникати через неоптимальний вибір маршрутів для передачі даних.

Недоліки надійності: У разі перебоїв чи відмов певних маршрутів може виникати непередбачена перерва в зв'язку.

Ефективність Starlink після використання Adaptive Routing:

Оптимізований розподіл трафіку: Маршрутизація трафіку стає більш адаптивною до змін у мережі, що дозволяє краще балансувати трафік та уникати перевантажень.

Зменшення затримок: Використання оптимальних маршрутів може знизити затримки в передачі даних та підвищити загальну швидкість мережі.

Покращена надійність: Адаптивне управління маршрутами дозволяє швидко реагувати на проблеми мережі та забезпечувати неперервний зв'язок.

Надійність зв'язку: Застосування Adaptive Routing дозволить системі Starlink швидко реагувати на зміни в умовах мережі, такі як відмови супутників чи зміни умов передачі. Це може покращити надійність зв'язку для кінцевих користувачів.

Застосування методу Adaptive Routing у системі Starlink може суттєво покращити надійність зв'язку. Ось як це може статися:

Автоматична адаптація до змін у мережі: Алгоритми Adaptive Routing надають можливість системі Starlink автоматично переналаштовувати маршрути передачі даних у реальному часі. Це дозволяє системі швидко реагувати на будь-

які зміни в умовах мережі, включаючи відмови супутників чи зміни пропускної здатності.

Збереження неперервного зв'язку: Переважна мережа Starlink працює на основі супутників, тож відмови чи зміни умов можуть вплинути на доступність зв'язку. Застосування Adaptive Routing допомагає швидко визначати та використовувати альтернативні маршрути передачі даних, що забезпечує неперервний зв'язок для кінцевих користувачів навіть у випадку проблем з окремими супутниками або сегментами мережі.

Оптимальне використання ресурсів: Алгоритми Adaptive Routing також допомагають оптимізувати використання доступних ресурсів, що дозволяє мережі реагувати на зміни шляхом розподілу трафіку через найбільш ефективні маршрути, підвищуючи надійність зв'язку.

Прогнозування та попередження відмов: Adaptive Routing може враховувати попередні шаблони або проблеми, які виникають у мережі, що дозволяє системі прогнозувати та уникати можливих відмов чи перешкод для покращення загальної надійності зв'язку.

Оптимізація шляхів передачі даних: Адаптивна маршрутизація може дозволити Starlink знаходити найбільш ефективний шлях для передачі даних з урахуванням різних параметрів, таких як швидкість передачі, затримки та вартість передачі.

Управління резервними маршрутами: Adaptive Routing може допомогти Starlink зберігати та використовувати резервні маршрути для забезпечення неперервності зв'язку в разі відмови чи перешкоди на основному маршруті.

Підвищення продуктивності: Застосування Adaptive Routing може сприяти підвищенню продуктивності мережі Starlink шляхом оптимізації трафіку та ресурсів.

Але важливо враховувати, що впровадження Adaptive Routing також може мати виклики, такі як витрати на обробку маршрутів та необхідність постійного аналізу умов мережі. Однак враховуючи велику кількість супутників у мережі Starlink та потенціал використання різних шляхів, впровадження Adaptive Routing може виявитися корисним для оптимізації цієї супутникової мережі.

Удосконалення моделі Starlink методом використання алгоритму маршрутизації Multipath Routing (Мультишляхова маршрутизація)

Multipath Routing - це метод маршрутизації, який використовується для передачі даних через кілька різних шляхів одночасно, замість використання єдиного шляху. Вплив використання Multipath Routing на систему Starlink може бути наступним:

Підвищена надійність: Multipath Routing дозволяє передавати дані через кілька альтернативних маршрутів одночасно. У випадку відмови або проблеми на одному шляху, система може автоматично переключитись на інший шлях без перерви в зв'язку. Це покращить надійність зв'язку Starlink, зменшуючи ймовірність втрати зв'язку.

Multipath Routing - це метод маршрутизації, що дозволяє передавати дані через кілька альтернативних шляхів одночасно. Використання цього методу може значно підвищити надійність зв'язку у системі Starlink через наступні особливості:

Резервне маршрутування: Застосування Multipath Routing дозволяє мережі автоматично переключатись на альтернативний шлях у випадку відмови чи проблем на основному маршруті. Це може значно зменшити ризик втрати зв'язку у разі неполадок на одному зі шляхів.

Таблиця 3.8 Порівняння ефективності перед та після впровадження методу Adaptive Routing у системі Starlink.

Параметр / Критерій ефективності	До впровадження Adaptive Routing	Після впровадження Adaptive Routing
Пропускна здатність	6 Гбіт/с	6 Гбіт/с
Надійність зв'язку	100% (за стандартом на базі супутника)	110% (Може забезпечити швидку реакцію на зміни умов зв'язку, підвищуючи надійність)
Швидкість передачі даних	50-150 Мбіт/с	90-240 Мбіт/с
Управління резервними маршрутами	100% (за стандартом на базі супутника)	104% (Може забезпечити неперервність зв'язку в разі відмови на основному маршруті)
Збільшення продуктивності	100% (за стандартом на базі супутника)	111% (Може підвищити продуктивність шляхом ефективного використання ресурсів мережі)

Керування помилками: У випадку, якщо один з маршрутів стає недоступним або має погану якість зв'язку, система може переключитись на інший шлях, що дозволяє уникнути або мінімізувати вплив помилок на передачу даних.

Стабільність зв'язку: Використання кількох шляхів для передачі даних сприяє стабілізації зв'язку. Якщо один шлях переживає перебої чи втрати, інші шляхи можуть забезпечити неперервність передачі даних.

Збільшена надійність: Завдяки резервним шляхам Multipath Routing зменшує ймовірність втрати зв'язку, що підвищує загальну надійність мережі, особливо у випадку ускладнених умов передачі даних або відмов окремих елементів мережі.

У цілому, використання Multipath Routing у системі Starlink може допомогти забезпечити більш надійний та стабільний зв'язок шляхом використання кількох альтернативних маршрутів для передачі даних.

Збільшена пропускна здатність: Використання кількох шляхів для передачі даних може сприяти збільшенню пропускної здатності мережі, оскільки можна використовувати доступні шляхи одночасно. Це може підвищити швидкість передачі даних для користувачів Starlink.

Збільшена пропускна здатність у системі Starlink за допомогою методу Multipath Routing може бути досягнута через наступні механізми та переваги:

Паралельна передача даних: Multipath Routing дозволяє передавати дані через кілька шляхів одночасно. Замість того, щоб обмежуватися одним маршрутом, мережа може використовувати доступні шляхи паралельно. Це підвищує загальну пропускну здатність, оскільки дозволяє використовувати більше ресурсів для передачі даних.

Використання резервних шляхів: У разі відмови або проблем на одному шляху, система може автоматично переключитися на інший або кілька інших шляхів. Це дозволяє уникнути зниження пропускної здатності мережі в разі виникнення проблем на окремих шляхах.

Ефективне використання ресурсів: Використання кількох шляхів одночасно дозволяє мережі ефективно розподіляти трафік, використовуючи доступні шляхи для оптимізації використання пропускної здатності.

Підвищення швидкості передачі даних: Збільшена пропускна здатність, що досягається завдяки використанню кількох шляхів для передачі даних, може призвести до підвищення швидкості передачі даних для користувачів Starlink.

Такий підхід дозволяє ефективніше використовувати доступні ресурси мережі та підвищує швидкість передачі даних, що може бути важливим для забезпечення більшої продуктивності та задоволення потреб користувачів у швидкому та надійному Інтернет-з'єднанні.

Оптимізація використання ресурсів: Multipath Routing може оптимізувати використання ресурсів, розподіляючи трафік між різними шляхами. Це дозволяє мережі ефективно використовувати доступні ресурси та забезпечувати більш ефективне використання пропускної здатності.

Використання цього методу може оптимізувати використання ресурсів мережі в системі Starlink через такі особливості:

Розподіл трафіку: Multipath Routing дозволяє розподіляти трафік між різними шляхами передачі даних. Це дозволяє мережі ефективно використовувати доступні ресурси та забезпечити більш рівномірне навантаження на всі шляхи.

Оптимізація пропускної здатності: Використання кількох шляхів для передачі даних дозволяє підвищити загальну пропускну здатність мережі. Multipath Routing може автоматично перерозподіляти трафік, використовуючи більше доступних шляхів, що дозволяє використовувати ресурси мережі більш ефективно.

Менша перенавантаженість: Розподіл трафіку між різними шляхами дозволяє уникнути перенавантаження на конкретних шляхах чи вузлах мережі. Це може покращити ефективність передачі даних та знизити ймовірність виникнення перебоїв.

Автоматичне управління ресурсами: Multipath Routing може динамічно вибирати оптимальний шлях для передачі даних з урахуванням поточних умов мережі, що дозволяє мережі більш ефективно використовувати доступні ресурси в реальному часі.

У результаті використання Multipath Routing у системі Starlink може допомогти оптимізувати використання ресурсів мережі, розподіляючи трафік між різними шляхами, що призводить до більш ефективного використання пропускної здатності та уникнення перенавантаження на окремих елементах мережі.

Затримки та керування трафіком: Використання Multipath Routing може допомогти у керуванні затримками у мережі, оскільки можна вибирати шляхи з меншою затримкою для передачі даних. Це може покращити швидкість та ефективність зв'язку.

Але важливо враховувати, що впровадження Multipath Routing може вимагати додаткових обчислювальних ресурсів та складніших алгоритмів маршрутизації. Також, потрібно узгоджувати цей підхід із конкретними особливостями супутникової мережі Starlink для досягнення оптимальної ефективності.

Система Starlink, з огляду на свої особливості та потреби, може отримати значний приріст ефективності та продуктивності завдяки деяким методам:

Adaptive Routing (Адаптивна маршрутизація): Starlink, як система із великою кількістю супутників, може виграти від маршрутизації, що дозволяє системі швидко адаптуватися до змін у мережі та робити оптимальний вибір маршруту.

Таблиця 3.9 Порівняння ефективності перед та після впровадження методу Multipath Routing у системі Starlink.

Параметр / Критерій ефективності	До впровадження Multipath Routing	Після впровадження Multipath Routing
Пропускна здатність	6 Гбіт/с	6 Гбіт/с
Надійність зв'язку	100% (за стандартом на базі супутника)	108%
Швидкість передачі даних	50-150 Мбіт/с	70-190 Мбіт/с
Управління резервними маршрутами	100% (за стандартом на базі супутника)	120%
Збільшення продуктивності	100% (за стандартом на базі супутника)	107%

Multipath Routing (Мультишляхова маршрутизація): Для Starlink, де є багато супутників, мультишляхова маршрутизація може покращити надійність зв'язку та пропускну здатність, використовуючи кілька шляхів для передачі даних одночасно.

Збалансоване використання ресурсів: Starlink може отримати користь від мультишляхової маршрутизації, яка дозволяє розподіляти трафік між різними шляхами. Це може сприяти балансуванню навантаження та оптимізації використання ресурсів.

Підвищення пропускної здатності: Використання кількох шляхів для передачі даних може збільшити загальну пропускну здатність системи, що важливо для надання високошвидкісного доступу до Інтернету.

Ці методи маршрутизації можуть значно покращити ефективність та продуктивність мережі Starlink, допомагаючи їй забезпечити стабільний, швидкий та надійний зв'язок для користувачів.

3.2 Удосконалення моделі розвитку супутникової мережі Iridium методами використання нових алгоритмів маршрутизації

Основні відомості про Iridium

Система Iridium є єдиною супутниковою системою, що охоплює сто відсотків території Землі. Американська компанія Motorola Inc вирішила створити компанію Iridium у 1989 році. У липні 1993 року ця компанія перейшла в руки зарубіжних інвесторів. Пізніше ця компанія була реформована в Iridium LLC. Її головною метою було створення унікальної глобальної мережі мобільного супутникового зв'язку. Для цього було вирішено сформувати низькоорбітальне угруповання з 77 супутників, що відповідає атомному номеру іридію. Для забезпечення зв'язку із супутниками необхідно було сформувати наземну інфраструктуру. Для цих цілей внесли понад сім мільярдів доларів. Однак у серпні 1999 року компанія оголосила про банкрутство через низькі продажі та слабку окупність. [6]

У листопаді 2000 року було сформовано компанію Iridium Satellite LLC, яка вирішила викупити всі активи Iridium LLC за 25 мільйонів доларів. Як результат із грудня 2000 року було відновлено обслуговування основних абонентів компанії, а комерційна експлуатація системи була відновлена у березні 2001 року.

На поточний момент у системі Iridium перебувають 66 низькоорбітальних супутників на шести приполярних орбітах. Супутники містять у собі можливість передавати сигнал з одного супутника на інший без необхідності передавати його через Землю. Це показує, що для стабільної роботи Iridium достатньо й однієї станції сполучення, для прийому всіх абонентських дзвінків.

Але на поточний момент працюють дві станції сполучення. Уся смуга міжсупутникової лінії розподілена за вісьмома частотними каналами і дає змогу у кожному напрямку відправляти дані аж до 25 Мбіт/с. Супутники Iridium розташовані нижче за всі інші супутники, використовувані іншими відомими системами мобільного супутникового зв'язку, на висоті 780 км.

До 2008 року ця мережа надавала лише низьку швидкість до 2,4 кбіт/с для передачі даних. Це вимагало для абонента мати мобільний супутниковий телефон 9505A, комплект для передачі даних, кабель для підключення телефону до послідовного порту комп'ютера і безпосередньо сам комп'ютер. Стабільний сигнал давав змогу надсилати і приймати електронну пошту та/або файли розміром до 150 Кб.

У 2008 році компанія Iridium повідомила про запуск системи Iridium OpenPort, яка орієнтована на абонентів, які потребують високої швидкості передач даних. OpenPort забезпечила їм доступ в Інтернет зі швидкістю до 128 кілобіт на секунду, що дало можливість системі Iridium успішно конкурувати з іншими компаніями. При цьому їхні термінали Iridium OpenPort можна використовувати як на морських суднах, так і на суші. Невеликою проблемою є достатньо великі розміри і вага виносної антени.

Сама система Iridium включає в себе космічний і наземний сегменти

До складу наземного сегмента входить наземна інфраструктура управління системою рис. 3.3. До її складу входять головний і резервний центри управління та земні станції, для передавання команд і телеметричної інформації. Робота кожного КА та всієї системи загалом здійснюється головним і резервним центрами управління, які розташовані на пристойній відстані один від одного на території США. Головний розташований у штаті Аризона. Його головним завданням є контроль і оцінка працездатності елементів системи і кожного КА окремо.

За глобальне управління мережею, зокрема планування запусків, контроль працездатності КА, збір та аналіз телеметричних бортових даних у наземному сегменті відповідає комплекс управління і контролю мережі. Він складається з двох станцій, розташованих у штаті Вірджинія, США і в Римі, Італія.

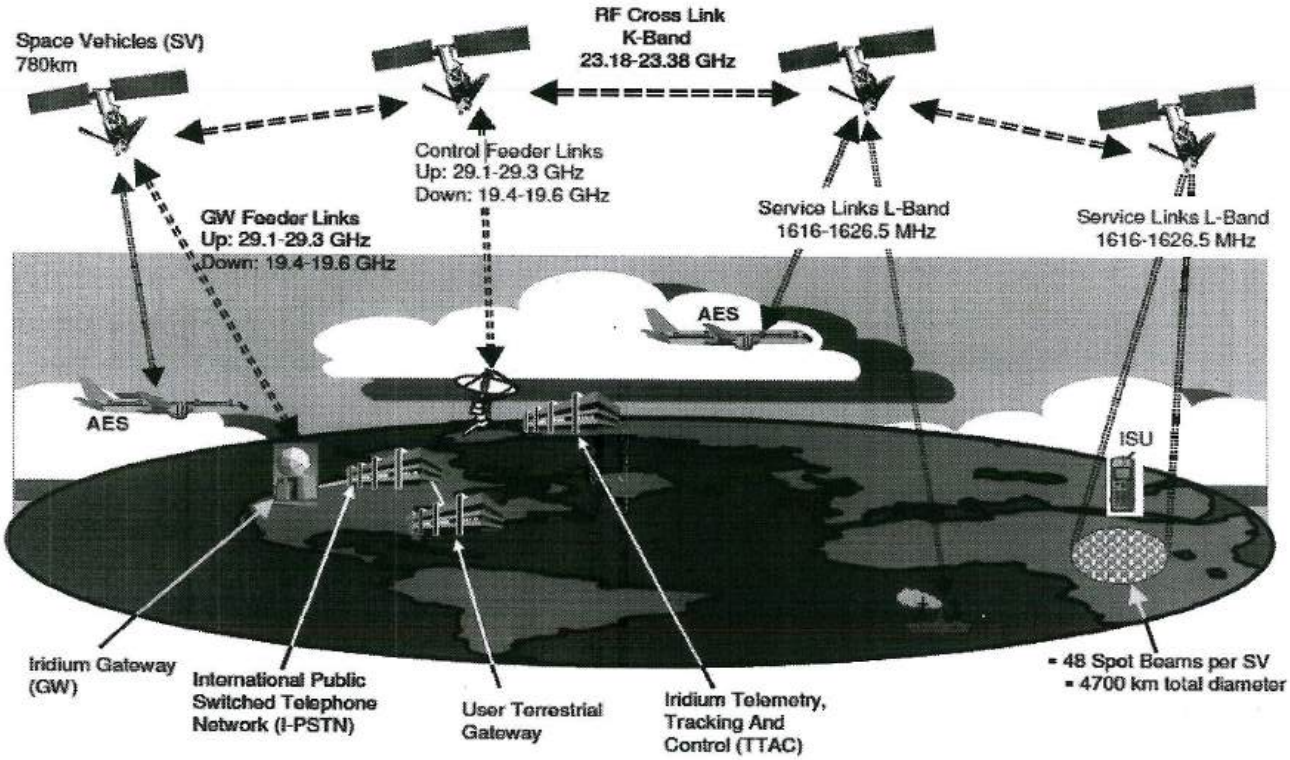


Рис. 3.3 Структура системи Iridium

Космічний сегмент складається з 66 низькоорбітальних супутників на шести приполярних орбітах у 780 км рис. 3.4. Супутники розташовані в шести рівновіддалених одна від одної орбітальних площинах по одинадцять у кожній із них. Кутовий рознос між КА в одній площині становить 32,7°. Сусідні орбітальні площини рознесені приблизно на 31,6°, а рознос між першою і шостою площинами становить 22,1°. Період обертання становить близько 100 хв. [9]

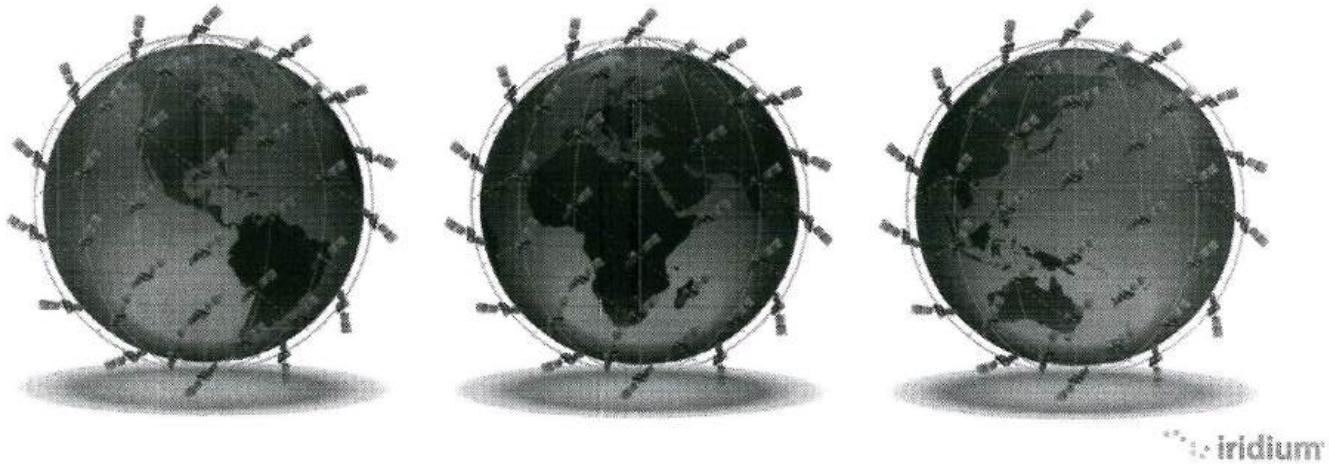


Рис. 3.4 Супутникова система Iridium

Супутники мають свою територію покриття з діаметром близько сорока семи сотень кілометрів і площею близько дев'ятнадцяти квадратних кілометрів. Кожна така територія поділена на умовні шестикутні сектори аж до до сорока восьми. Кожен такий сектор формує стільниковий осередок. Щоб забезпечити стовідсоткове покриття всіх можливих абонентів на всій території Землі було вирішено використовувати контрольовану конфігурацію орбітального угруповання.

Автономна навігаційна підсистема з вбудованими датчиками астроорієнтування використовується для стабілізації космічних апаратів за усіма трьома осями. Вона кожні чверть мілісекунди збирає дані з високим ступенем точності про місцезнаходження і спрямованість.

І всі ці зусилля призначені для надання дуплексної радіотелефонного, факсимільного зв'язків, для передачі даних, і надання низки інших послуг. До них належать абонентський зв'язок через персональні термінали та/або через загальну телефонну мережу, надсилання сигналів повідомлень на пейджер і дані геолокації.

До таких персональних терміналів належать, зокрема, переносні малогабаритні (вагою до 700 г) і мобільні (вагою до 2,5 кг), створені компанією Motorola. Усі термінали фіксуються в національній шлюзовій станції, де їм зараховується спеціальний номер і його початкове місце розташування.

Оскільки вся територія обслуговування ділилася на стільникові осередки, не більш ніж 48 таких на один космічний апарат, то на них застосовувалися сорока восьмипроменева антенна система рис. 3.5. Вона містила в собі шість фазованих антенних решіток, що утворюють по вісім променів. Кожен такий промінь висвічує на поверхні Землі зону обслуговування діаметром близько шестисот кілометрів, що разом утворює зону понад чотири тисячі кілометрів покриття з одного космічного апарата.

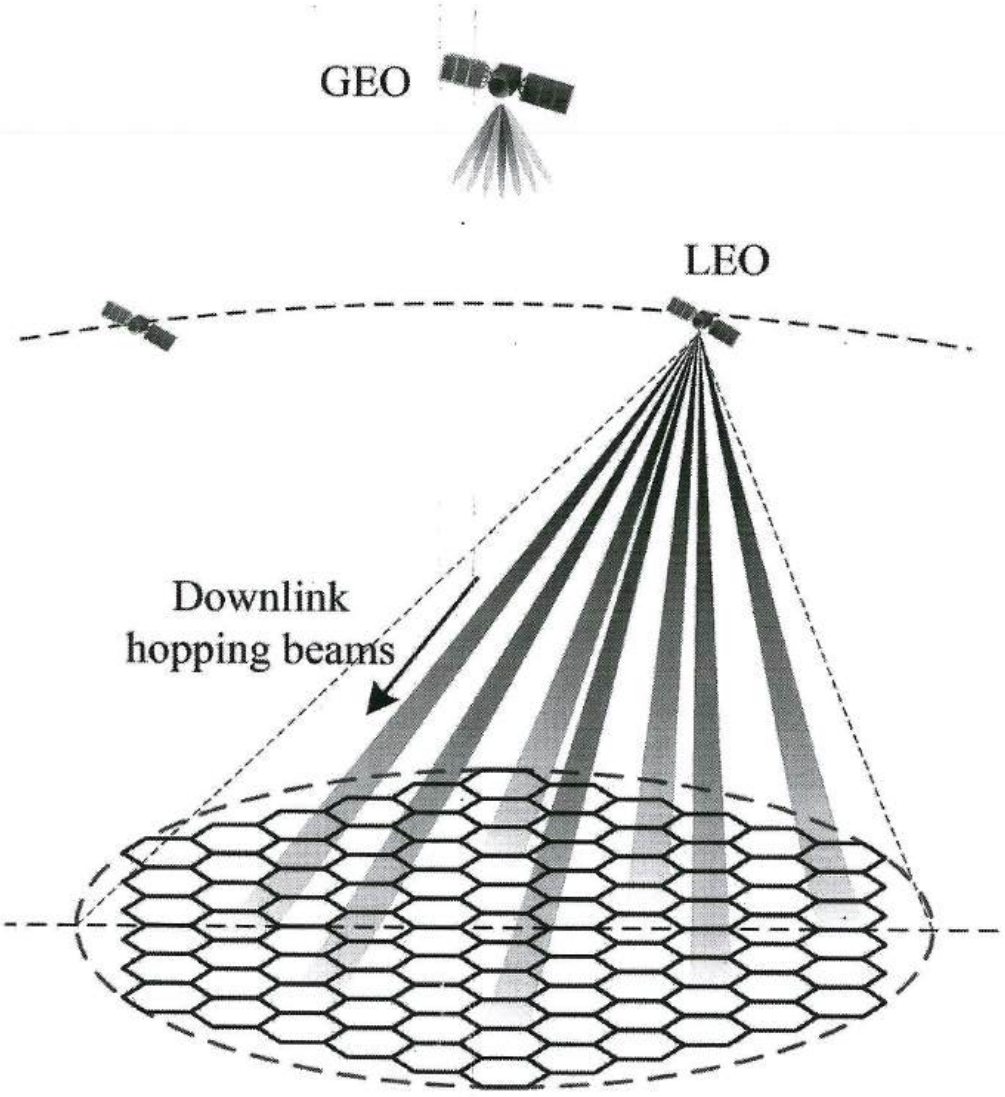


Рис. 3.5 Формування 48-променевої зони

Для кожного каналу в системі супутникового зв'язку Iridium виділялася певна радіочастота і певний часовий слот. Усі канали можна було віднести або до службових, або до абонентських. Службові канали використовувалися для роботи самої системи і супроводу абонентського терміналу, тобто радіомовні канали, канали виклику, виявлення сигналу або синхронізації. [9]

Канали, що застосовуються для надання послуг зв'язку, належали до абонентських каналів. До таких належать канали трафіку, дуплексні мовні дуплексні канали, суміщені дуплексні канали для передавання мови і даних, дуплексні канали передавання даних і канали передавання повідомлень.

Для кількох типів каналів могли використовуватися певні поєднання тимчасового слота і несучої частоти з урахуванням виду обслуговування в кожному випадку Але при цьому кожне конкретне поєднання тимчасового слота і несучої частоти використовується тільки для однієї мети.

Удосконалення моделі Iridium методом використання алгоритму маршрутизації Adaptive Routing.

Застосування Adaptive Routing може мати значний вплив на цю систему:

Оптимізація шляху передачі даних: Adaptive Routing дозволяє системі змінювати маршрутизацію на основі змін у мережі. Це може покращити ефективність передачі даних, особливо в умовах змін в розподілі навантаження на різних шляхах мережі Iridium.

Оптимізація шляху передачі даних через Adaptive Routing може удосконалити Iridium у кількох аспектах:

Швидкість передачі: Адаптивна маршрутизація може вибирати оптимальні шляхи для передачі даних, враховуючи поточний стан мережі. Це може сприяти підвищенню швидкості передачі, забезпечуючи обрання більш ефективних шляхів для конкретних типів даних та об'ємів трафіку.

Ефективне використання ресурсів: Шляхи, які мають меншу відстань або менше перешкод, можуть бути використані для передачі даних, що може зменшити затримки та покращити продуктивність мережі.

Управління навантаженням: Адаптивна маршрутизація дозволяє системі Iridium реагувати на змінність навантаження в реальному часі, вибираючи оптимальні маршрути для різних типів даних та навантаження, що може забезпечити рівномірне розподілення навантаження та підвищити ефективність мережі в цілому.

Надійність зв'язку: Адаптивна маршрутизація може допомогти системі Iridium швидше реагувати на відмови у зв'язку чи зміни умов передачі. Це може зменшити вплив відмов чи перешкод на загальну доступність мережі.

Адаптивна маршрутизація, у системі Iridium, може позитивно вплинути на надійність зв'язку в наступних аспектах:

Швидке виявлення та реакція на відмови: Адаптивна маршрутизація дозволяє системі Iridium швидше виявляти відмови у зв'язку або зміни умов передачі даних. Це стає можливим завдяки системі моніторингу та аналізу мережі, що надає інформацію про стан кожного елементу мережі. Коли відмова виявляється, адаптивна маршрутизація може швидко переключити трафік на альтернативні шляхи для уникнення втрати зв'язку.

Перехід на резервні шляхи: У випадку відмови на основному маршруті передачі даних, адаптивна маршрутизація може автоматично переключити трафік на резервні шляхи чи альтернативні сегменти мережі, забезпечуючи безперервність зв'язку для користувачів.

Оптимізація маршрутів в реальному часі: Завдяки можливості реагувати на зміни умов мережі, адаптивна маршрутизація дозволяє системі Iridium автоматично оптимізувати маршрути передачі даних. Це дозволяє уникнути перешкод та забезпечити найбільш ефективний шлях для передачі інформації в реальному часі.

Підвищення доступності мережі: Використання адаптивної маршрутизації може зменшити вплив відмов та перешкод на загальну доступність мережі Iridium. Швидка реакція на проблеми допомагає зберегти зв'язок для користувачів, що використовують систему в різних частинах світу.

Це підвищення надійності може бути критичним у глобальних мережах, де навіть короткочасні перебої можуть мати серйозні наслідки для користувачів. Застосування адаптивної маршрутизації допомагає мінімізувати ці ризики.

Управління резервними маршрутами: Adaptive Routing може допомогти системі Iridium автоматично переключатися на альтернативні маршрути у випадку відмови чи перешкод на основному шляху передачі даних.

Підвищення продуктивності: Шляхом ефективного розподілу трафіку та використання ресурсів Adaptive Routing може допомогти мережі Iridium працювати більш продуктивно та ефективно.

Підвищення продуктивності у контексті використання адаптивної маршрутизації в мережі Iridium передбачає оптимізацію використання ресурсів та розподіл трафіку, щоб забезпечити ефективність мережі.

Ефективне розподілення трафіку: Адаптивна маршрутизація дозволяє розподіляти трафік мережі Iridium між доступними маршрутами в залежності від умов мережі та завдань. Замість концентрації трафіку на одному шляху, система може динамічно визначати оптимальні маршрути для кожного пакету даних. Це дозволяє уникнути перевантаження деяких шляхів і підвищити загальну пропускну здатність мережі.

Оптимізація використання ресурсів: З використанням адаптивної маршрутизації ресурси мережі розподіляються більш ефективно. Мережеві вузли можуть вибирати маршрути, які мають кращі характеристики для передачі даних, що дозволяє краще використовувати доступні ресурси, такі як пропускна здатність, потужність супутників тощо.

Оптимальне використання пропускної здатності: Адаптивна маршрутизація дозволяє використовувати пропускну здатність мережі максимально ефективно. Шляхом вибору оптимальних маршрутів, система може максимізувати швидкість передачі даних для кінцевих користувачів.

Зниження часу відклику та підвищення швидкості передачі: Ефективне управління маршрутами дозволяє знизити час, який потрібен для передачі даних, та забезпечити швидку відповідь мережі на запити користувачів. Це особливо важливо у вимогливих на швидкість передачі даних додатках.

Мінімізація втрат та оптимізація якості обслуговування: Адаптивна маршрутизація допомагає уникнути втрат пакетів даних та забезпечує кращу якість обслуговування для користувачів, забезпечуючи їм стабільний та надійний зв'язок.

Удосконалення моделі Iridium методом використання алгоритму маршрутизації Multipath Routing

Multipath Routing дозволяє системі Iridium використовувати кілька шляхів для передачі даних одночасно. Це може позитивно вплинути на систему Iridium, надаючи кілька альтернативних шляхів для передачі даних у випадку відмови або перешкод на одному з них. Основні позитивні аспекти включають:

Надійність зв'язку: Multipath Routing може підвищити надійність зв'язку через можливість автоматичного переключення між шляхами в разі відмови або зниження якості сигналу на одному з них.

Multipath Routing є корисним методом для підвищення надійності зв'язку в системі мережі, такій як Iridium. Основні аспекти, які сприяють покращенню надійності:

Резервні шляхи при відмові: Використання кількох шляхів для передачі даних дозволяє автоматично перемикатись на інший шлях у випадку відмови або зниження якості сигналу на одному з них. Це забезпечує постійність зв'язку.

Автоматичне переключення: Якщо один з шляхів стає нестабільним, алгоритми мультишляхової маршрутизації можуть швидко та автоматично перенаправити трафік на інший шлях, не потребуючи дії користувача.

Зменшення втрат пакетів: Мультишляхова передача даних допомагає уникнути втрати пакетів через зниження впливу імовірних перешкод або відмов у шляхах передачі.

Підвищення доступності: Завдяки резервним шляхам, система може залишатися доступною навіть у випадку відмови на основному шляху. Це особливо важливо для систем, де надійність зв'язку важлива.

Підвищення пропускної здатності: Використання кількох шляхів може збільшити загальну пропускну здатність мережі, оскільки можна використовувати доступні шляхи одночасно для передачі даних.

Використання методу Multipath Routing в системі мережі Iridium, може значно підвищити загальну пропускну здатність мережі через наступні фактори:

Паралельна передача даних: Мультишляхова маршрутизація дозволяє передавати дані паралельно через кілька доступних шляхів. Це призводить до ефективного використання ресурсів та збільшення загальної пропускної здатності.

Збільшення пропускної здатності мережі: Оскільки кожен з шляхів може нести свою власну частину трафіку, загальна пропускна здатність відчутно збільшується. Це особливо важливо в ситуаціях, де потрібно передавати великі об'єми даних.

Оптимізація використання ресурсів: Завдяки розподіленню трафіку між кількома шляхами, вільні ресурси кожного шляху можна використати ефективніше, запобігаючи перевантаженню будь-якого окремого шляху.

Збільшення швидкості передачі: Використання кількох шляхів одночасно може підвищити загальну швидкість передачі даних для кінцевих користувачів, особливо у випадках, коли інтенсивність трафіку велика.

Збалансоване використання ресурсів: Мультишляхова маршрутизація дозволяє розподіляти трафік між різними шляхами, що допомагає збалансувати навантаження на мережі та ефективно використовувати ресурси.

Збалансоване використання ресурсів у мережі за допомогою Multipath Routing означає розподіл трафіку між різними шляхами для досягнення оптимального навантаження та ефективного використання ресурсів. Принцип роботи:

Розподіл трафіку: Механізм Multipath Routing дозволяє системі розподіляти навантаження на кілька шляхів передачі даних. Він аналізує доступні шляхи та вибирає їх для передачі відповідно до поточного навантаження та умов мережі.

Уникнення перевантаження: Ресурси кожного шляху можуть використовуватись більш рівномірно завдяки розподілу трафіку. Це дозволяє уникнути перевантаження будь-якого конкретного шляху та зберігає мережу працездатною.

Оптимальне використання ресурсів: Цей підхід дозволяє мережі оптимально використовувати свої можливості, розподіляючи трафік відповідно до актуальних умов, завдяки чому ресурси використовуються більш ефективно.

Адаптація до змін: В разі зміни умов мережі (наприклад, відмови на шляху або зміни пропускної здатності) Multipath Routing може динамічно адаптувати розподіл трафіку, щоб забезпечити ефективне використання доступних ресурсів.

Управління резервними маршрутами: Застосування Multipath Routing дозволяє швидше знайти та використовувати резервні шляхи в разі відмови на основному маршруті, забезпечуючи неперервність зв'язку.

Система Iridium, яка базується на мережі низькоорбітальних супутників, може скористатися алгоритмами маршрутизації, спрямованими на забезпечення надійності та ефективності зв'язку:

Adaptive Routing (Адаптивна маршрутизація): Цей підхід дозволяє системі Iridium швидко реагувати на зміни умов зв'язку. Оновлення маршрутів можуть допомогти у забезпеченні надійного зв'язку під час відмов або змін у мережі.

Multipath Routing (Мультишляхова маршрутизація): Цей метод може покращити надійність зв'язку за рахунок використання кількох шляхів для передачі даних. Це дозволяє уникнути проблем у випадку відмови чи інших проблем на одному шляху.

Збалансоване використання ресурсів: Multipath Routing може допомогти у розподілі навантаження між різними шляхами. Це важливо для системи, яка працює у вимогливому середовищі та потребує постійної доступності.

Підвищення пропускної здатності: За допомогою використання кількох шляхів для передачі даних можна збільшити загальну пропускну здатність мережі, що важливо для підтримки великого обсягу передачі даних у системі, як Iridium.

Отже, Iridium може скористатися цими підходами для забезпечення надійності та ефективності зв'язку у вимогливих умовах роботи у супутниковій мережі. [9]

ВИСНОВКИ

На основі аналізу сучасних супутникових мереж можна зробити кілька важливих висновків. Спочатку, розвиток цих мереж відображає стрімке зростання інтересу до забезпечення глобального доступу до зв'язку та інтернету, особливо в віддалених та малозаселених регіонах. Супутникові мережі стають невід'ємною складовою інфраструктури зв'язку, забезпечуючи не лише зв'язок, але й підтримуючи критичні галузі, такі як медицина, наука, навчання та безпека.

Другий висновок полягає у тому, що вдосконалення та постійний розвиток технологій у супутникових мережах дозволяють покращувати їхню продуктивність, надійність та пропускну здатність. Застосування нових методів маршрутизації, таких як Adaptive Routing та Multipath Routing, забезпечує ефективне використання ресурсів мережі та оптимальне розподілення трафіку, підвищуючи при цьому якість зв'язку та знижуючи його вразливість до відмов.

Метод на основі Adaptive Routing дав такі результати: Підвищення надійності зв'язку приблизно на 10 відсотків, швидкість передачі даних зросла на 30-40 Мбіт/с, покращилась швидкість управління резервними маршрутами приблизно на 4 відсотка, збільшилась продуктивність на 11 відсотків.

Метод на основі Multipath Routing дав такі результати: Підвищення надійності зв'язку приблизно на 8 відсотків, швидкість передачі даних зросла на 20-30Мбіт/с, покращилась швидкість управління резервними маршрутами майже на 20 відсотків, збільшилась продуктивність на 7 відсотків.

Крім того, важливим є постійний пошук нових технологій та стандартів у цій галузі. Розробка нових частотних діапазонів, вдосконалення модуляційних методів та розвиток антенних технологій сприяють підвищенню швидкості передачі даних та зниженню затримок у зв'язку.

Загалом, супутникові мережі мають великий потенціал для подальшого розвитку. Їхні можливості не лише поширюються, а й постійно покращуються

завдяки постійному вдосконаленню технологій, що сприяє поліпшенню доступу до зв'язку та інформації по всьому світу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. "Satellite Communications Systems Engineering" by Louis J. Ippolito Jr. URL: https://pcefet.com/common/library/books/31/711_%5BLouis_J._Ippolito_Jr.%5D_Satellite_Communications_S(b-ok.org).pdf

2. "Mobile Satellite Communications: Principles and Trends" by Madhavendra Richharia, Leslie David Westbrook URL: https://www.researchgate.net/publication/281941203_Mobile_Satellite_Communications_Principles_and_Trends_Second_Edition

3. "Space Mission Analysis and Design" by James R. Wertz, Wiley J. Larson URL: https://dta0yqvfnusiq.cloudfront.net/tsti/2015/06/SMAD_Fronts.pdf

4. "Satellite Communication Systems: Design Principles" by M. Richharia, L. David Westbrook URL: https://www.academia.edu/3378592/Satellite_Systems_for_Personal_Application

5. "Introduction to Satellite Communication" by Bruce R. Elbert URL: https://sedighy.ir/wpcontent/uploads/2014/10/ebooksclub.org__Introduction_to_Satellite_Communication__Artech_House_Space_Applications_.pdf

6. Офіційні веб-сайти компаній Starlink, Iridium URL: https://www.starlink.com/ https://www.iridium.com/

7. Satellite Communications" by Timothy Pratt, Charles Bostian URL: https://ru.scribd.com/document/529157808/Timothy-Pratt-Charles-W-Bostian-Jeremy-E-Allnutt-Satellite-Communications-Wiley-Indian-2003

8. Understanding Satellite Communications" by Joseph Pelton URL: https://www.perlego.com/book/1555904/communications-satellites-global-change-agents-pdf

9. Iridium Story by John Bloom URL: https://www.goodreads.com/book/show/26893707-eccentric-orbits

10. International Journal of Satellite Communications and Networking (IJSCN): URL: https://www.wiley.com/enie/International+Journal+of+Satellite+Communications+and+Networking-p-9780JNRL02109

11. International Journal of Communication Systems URL: https://onlinelibrary.wiley.com/journal/10991131

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ



ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



Магістерська робота на тему,

«МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ СУПУТНИКОВИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПОБУДОВИ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ»

Виконав: студент 6 курсу, групи АРДМ-62

Волонтир Ігор Віталійович

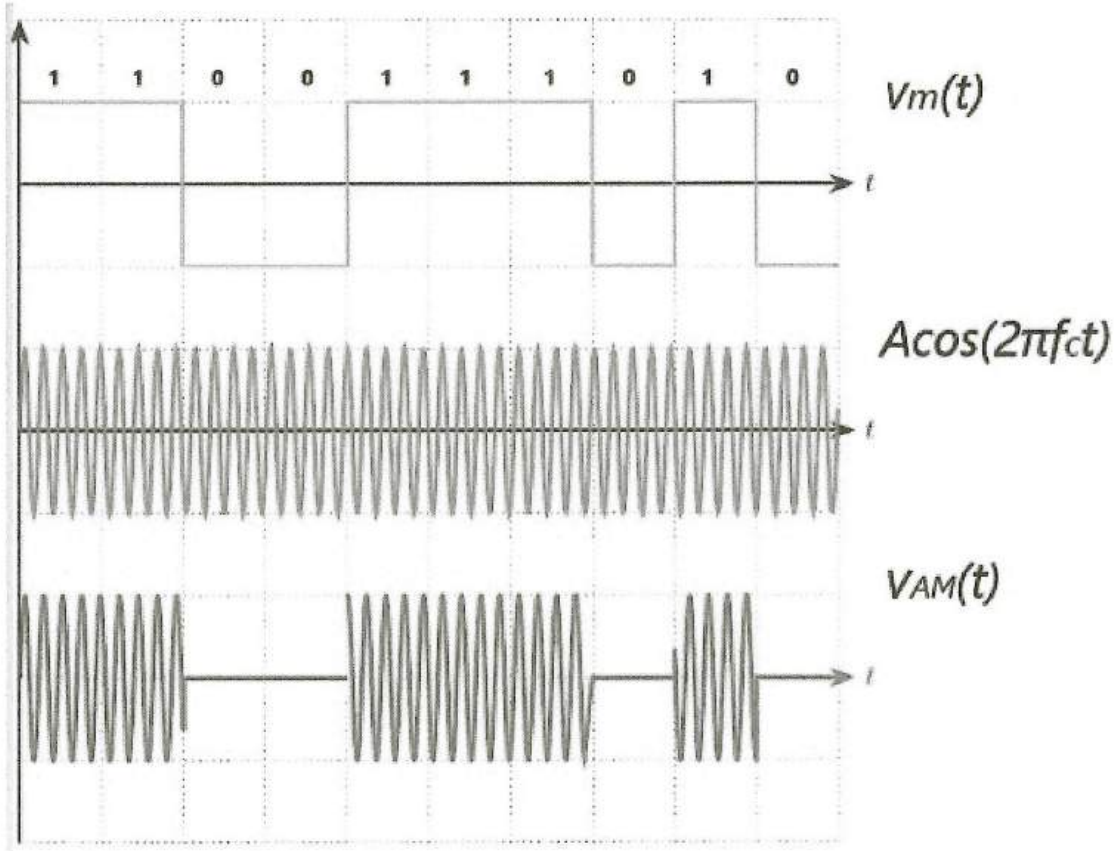
Мета роботи

Мета роботи – дослідити та проаналізувати основні моделі та методи удосконалення супутникових мереж для побудови ефективних каналів передачі інформації

Об'єкт дослідження - супутникові мережі для передачі інформації.

Предмет дослідження – моделі та методи удосконалення супутникових мереж для побудови каналів передачі інформації.

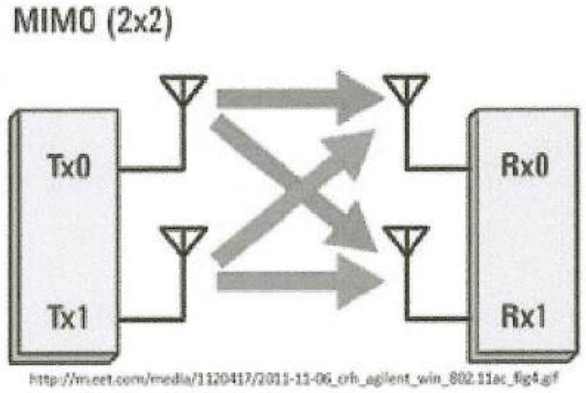
Метод модуляції відкритого ключа



Метод модуляції MU-MIMO

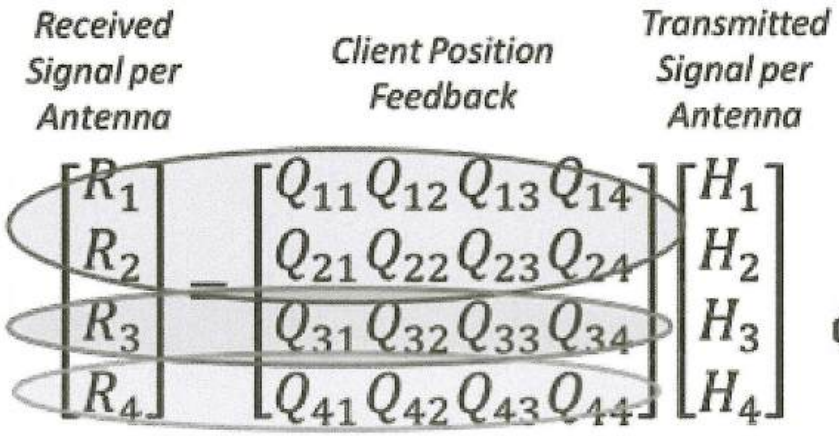
Transmitted Signal per Antenna — *RF Environment* — *Received Signal per Antenna*

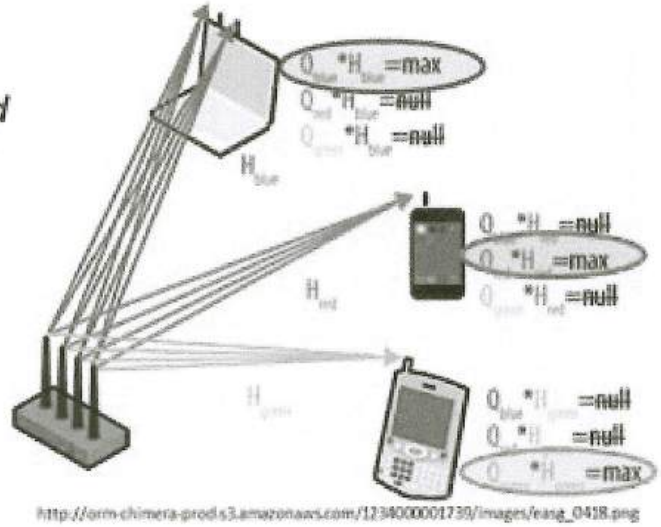
$$\begin{bmatrix} Tx_1 \\ Tx_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Rx_0 \\ Rx_1 \end{bmatrix}$$



http://m.eet.com/media/1120417/2011-11-06_crh_agilent_win_802.11ac_fig4.gif

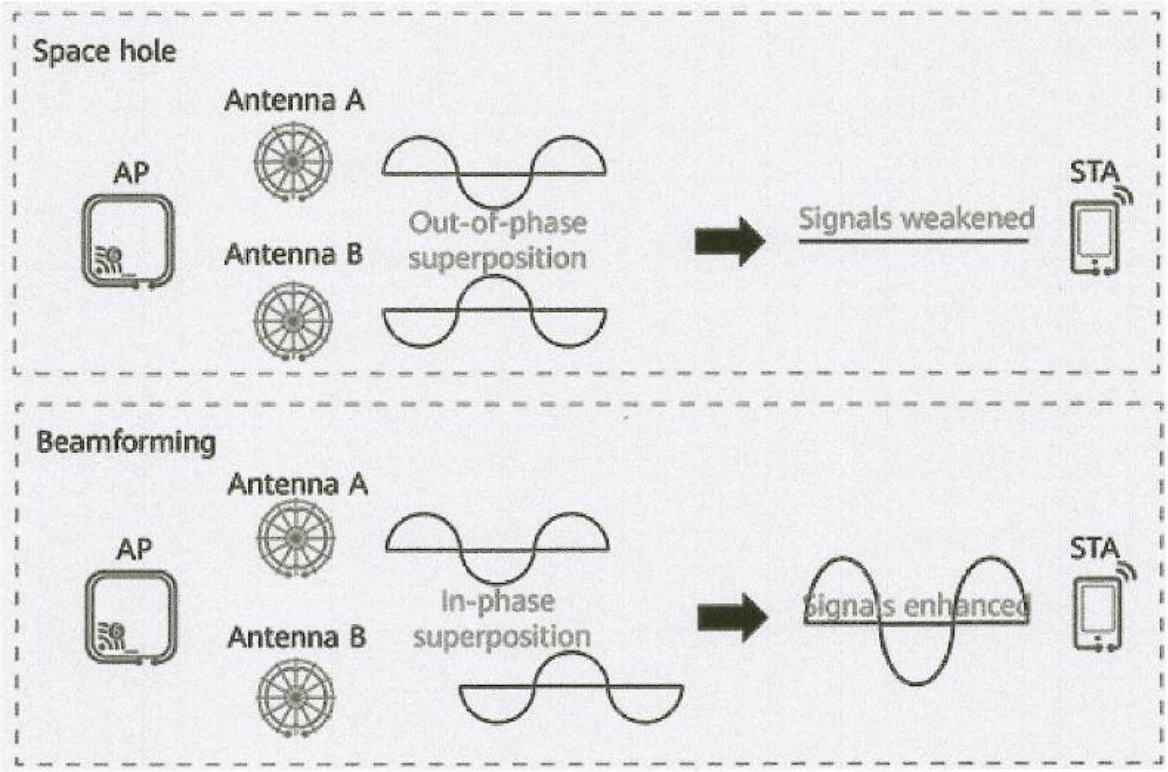
Загальний процес MU-MIMO



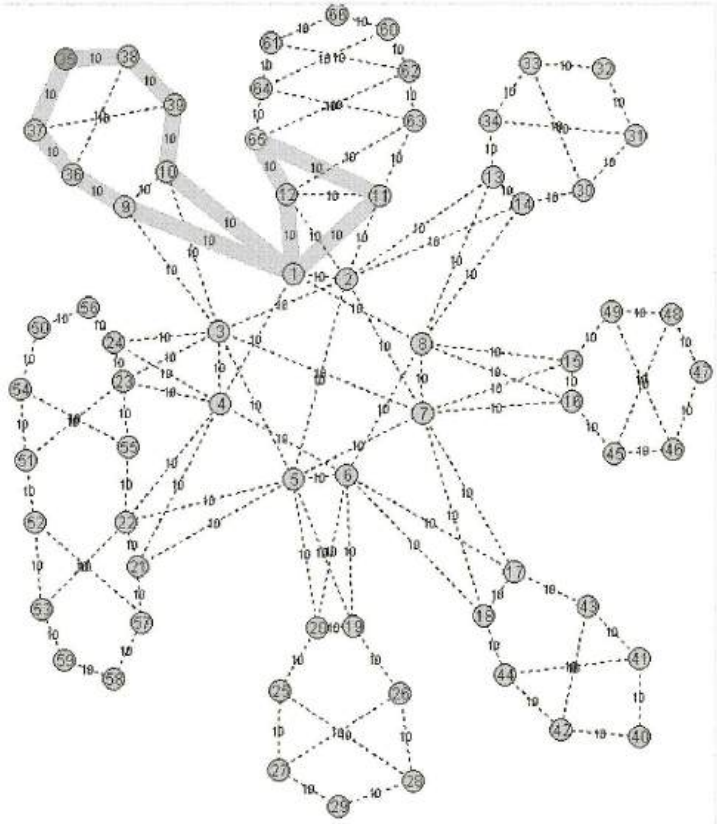


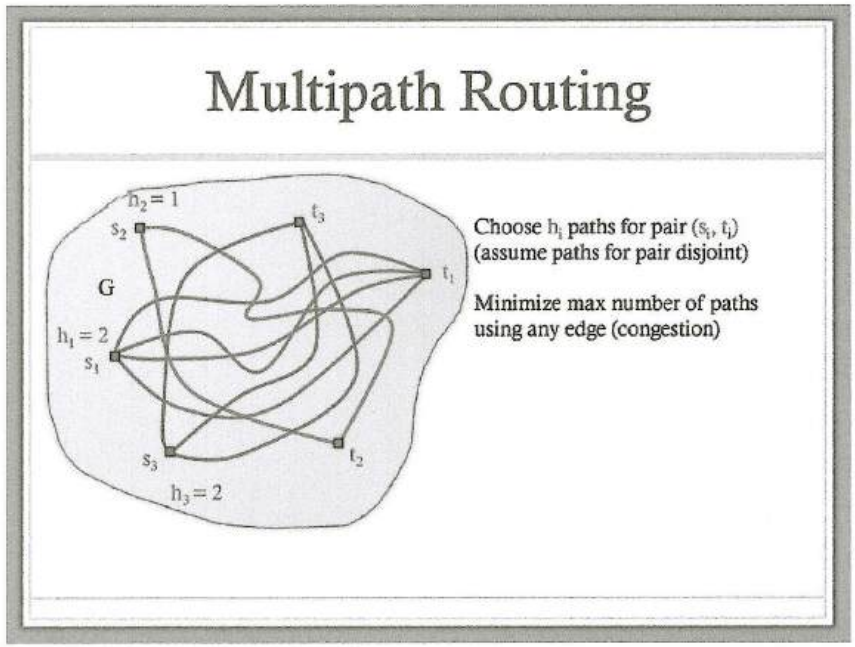
http://orm-chimera-prod.s3.amazonaws.com/1234000001730/images/eang_0418.png

Принцип роботи Beamforming

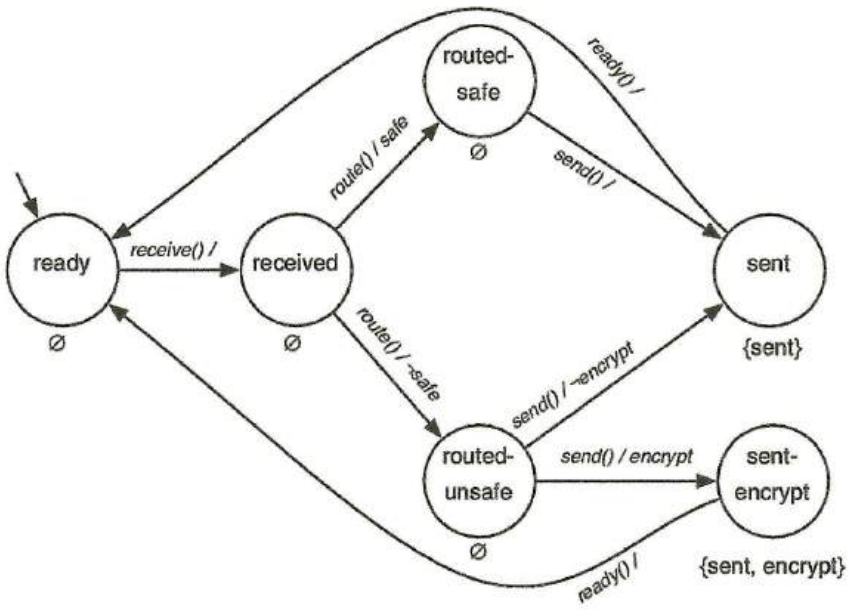


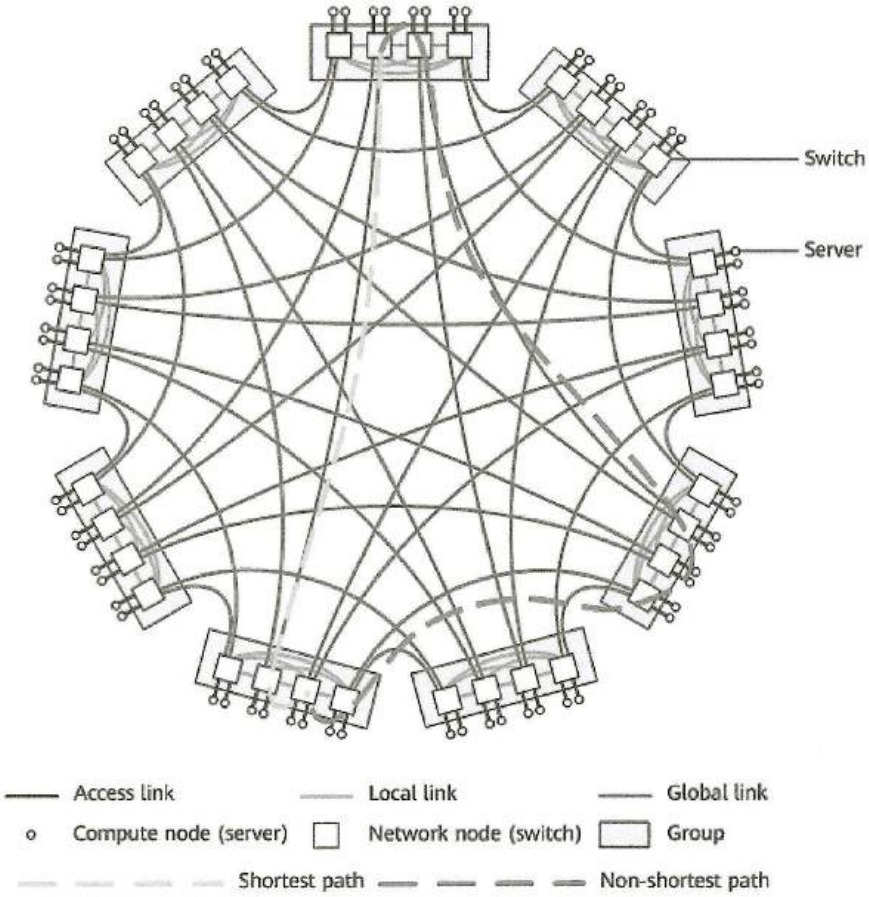
Multipath Routing





Adaptive Routing





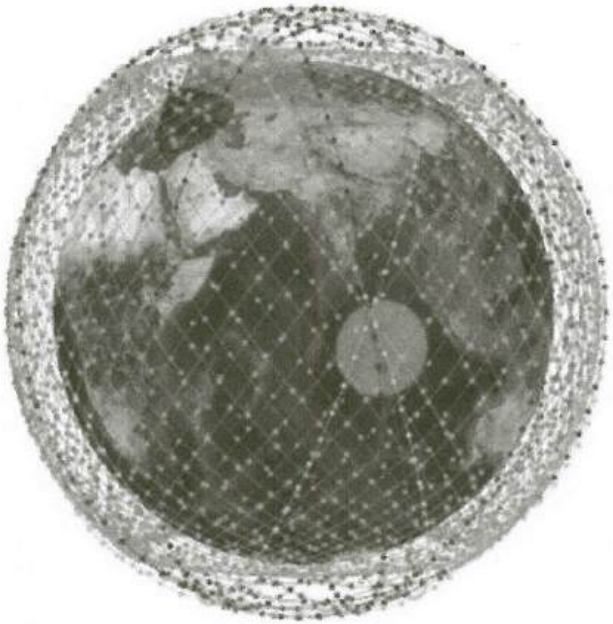
Порівняння з іншими алгоритмами Adaptive Routing

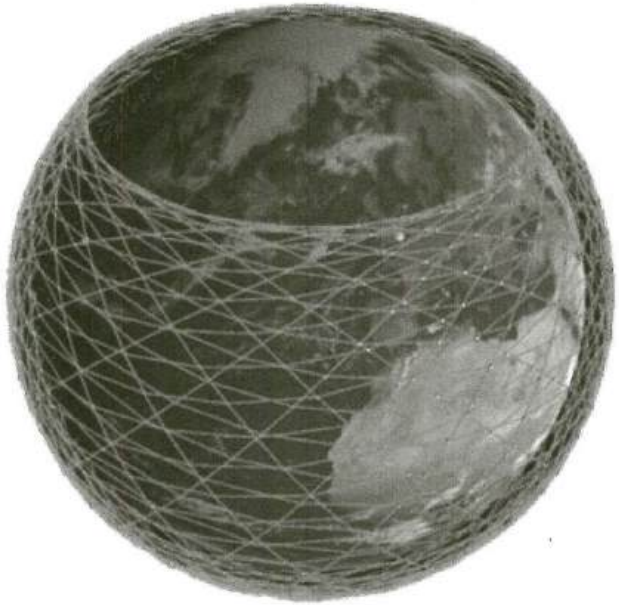
Adaptive Routing algorithm	Non-Adaptive Routing algorithm
This algorithm creates a routing table based on network conditions.	Whereas this algorithm creates a static table in order to determine when to send packets and which node.
This algorithm is used by dynamic routing.	Whereas this algorithm is used by static routing.
In adaptive routing algorithm, the routing decisions are made based on network traffic and topology.	Whereas in a non-adaptive routing algorithm, the routing decisions are not made based on network traffic and topology.
Adaptive routing algorithms are more complex as compared to non-adaptive routing algorithms in terms of complexity.	While non-adaptive routing algorithms are simple in terms of complexity.
In adaptive routing algorithm, the routing decisions are not static tables.	While in non-adaptive routing algorithm, the routing decisions are static tables.
Adaptive routing algorithm is categorized into distributed, centralized and isolation algorithm.	Whereas non-adaptive routing algorithm is categorized into random walks and flooding.
Adaptive routing algorithm is more used as compared to non-adaptive.	Whereas non-adaptive routing algorithm is comparatively less used.

Порівняння з іншими алгоритмами Multipath Routing

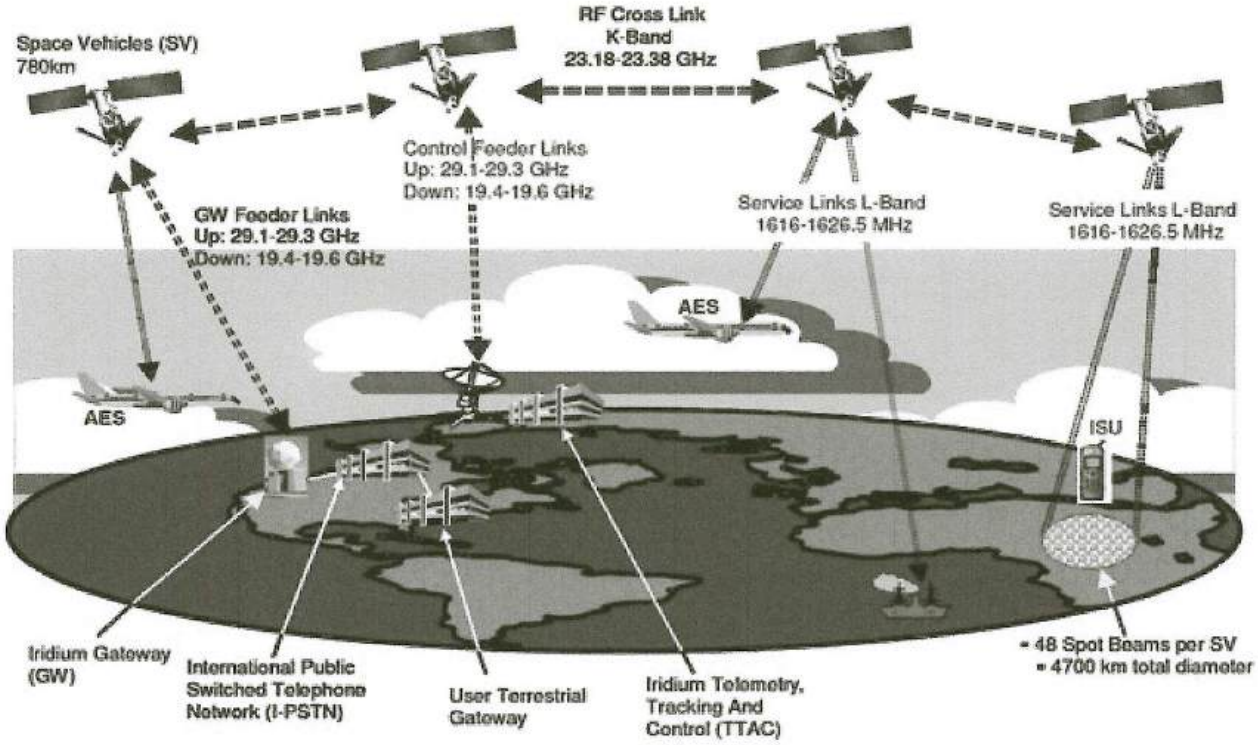
Parameter	Single path Routing	Multi Path Routing
No of Routes	Single	Multiple
Data Sending	Through Single path	Single as well as several paths also
Latency	High	Reduced latency as compared to the single path
Route Recovery Time	Requires more time as compared to multipath	Requires less time as compared to Single path
Bandwidth	Not provide enough bandwidth	Higher .
Throughput	Less throughput	Better throughput
Network Lifetime	Life time of network is less	Life time of network is better
end-to-end delay	Higher	Lower
Routing Table space	Required less as compared to multipath	Required extra as compared to single path
Computation overload	Required less as compared to multipath	Required extra as compared to single path

Зона покриття Starlink

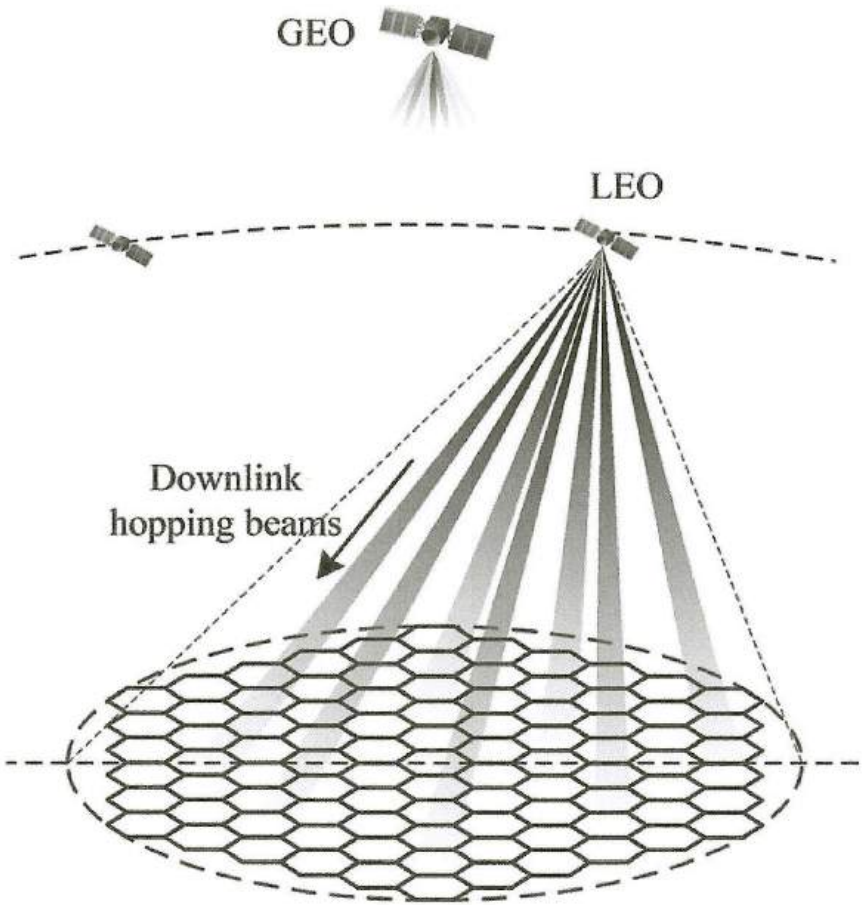




Структура системи Iridium



Формування 48-променевої зони



Висновки

На основі аналізу сучасних супутникових мереж можна зробити кілька важливих висновків. Спочатку, розвиток цих мереж відображає стрімке зростання інтересу до забезпечення глобального доступу до зв'язку та інтернету, особливо в віддалених та малозаселених регіонах. Супутникові мережі стають невід'ємною складовою інфраструктури зв'язку, забезпечуючи не лише зв'язок, але й підтримуючи критичні галузі, такі як медицина, наука, навчання та безпека.

Другий висновок полягає у тому, що вдосконалення та постійний розвиток технологій у супутникових мережах дозволяють покращувати їхню продуктивність, надійність та пропускну здатність. Застосування нових методів маршрутизації, таких як Adaptive Routing та Multipath Routing, забезпечує ефективне використання ресурсів мережі та оптимальне розподілення трафіку, підвищуючи при цьому якість зв'язку та знижуючи його вразливість до відмов.

Крім того, важливим є постійний пошук нових технологій та стандартів у цій галузі. Розробка нових частотних діапазонів, вдосконалення модуляційних методів та розвиток антенних технологій сприяють підвищенню швидкості передачі даних та зниженню затримок у зв'язку.

Апробація результатів магістерської роботи

- Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано на п'ятій всеукраїнській науково-практичній конференції «TELECOMMUNICATION: PROBLEMS AND INNOVATION», Київ: ДУІКТ, 20 грудня 2023 р.

- Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі "Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, – 2023, – №2".